

Simultane Strahlextraktion an ELSA

Max Ammann

Bachelorarbeit in Physik
angefertigt im Physikalischen Institut der Universität Bonn

vorgelegt der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
Bonn

Februar 2025

Danksagung

Zunächst möchte ich Herrn Prof. Dr. Klaus Desch für die Möglichkeit danken, meine Bachelorarbeit in der ELSA-Arbeitsgruppe zu schreiben. Ein weiterer Dank gilt Dr. Dennis Proft, der sich bereit erklärt hat, diese Arbeit als Zweitkorrektor zu bewerten.

Des Weiteren danke ich ihm und Dr. Michael Switka für die hervorragende Betreuung während meiner Bachelorarbeit. Sie standen mir bei Fragen und Problemen stets mit Rat und Tat zur Seite. Ebenso möchte ich mich bei meinen Bürokollegen in beiden Büros für ihre zahlreichen Ratschläge, Korrekturen und die angenehmen Gespräche bedanken. Es war eine lehrreiche und zugleich angenehme und unterhaltsame Zeit, in der einem nie langweilig wurde.

Ein besonderer Dank gilt Leonardo Thome, der mich bei Messungen und Simulationen stets unterstützt hat, auch wenn es mal etwas später wurde. Zudem möchte ich mich bei der gesamten Arbeitsgruppe für die freundliche und äußerst hilfsbereite Atmosphäre bedanken, die maßgeblich dazu beigetragen hat, dass ich mich von Anfang an wohlfühlt habe. Besonders hervorheben möchte ich die Montags-Meetings, in denen die Ergebnisse der vergangenen Woche vorgestellt und gemeinsam diskutiert wurden. Diese Runden habe ich stets als äußerst hilfreich und inspirierend empfunden.

Zu guter Letzt möchte ich meiner Familie von Herzen für ihre bedingungslose Unterstützung danken, nicht nur während meines Studiums, sondern in jeder Hinsicht.

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie die Zitate kenntlich gemacht habe.

Bonn,

Datum

.....,

Unterschrift

1. Gutachter*in: Prof. Dr. Klaus Desch
2. Gutachter*in: Dr. Dennis Proft

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Theoretischer Hintergrund	3
2.1	Koordinatensystem im Beschleuniger	3
2.2	Grundbegriffe der Beschleunigerphysik	3
2.3	Beschleunigeranlage ELSA	4
3	Simulationen der Strahldynamik mit elegant	8
3.1	Allgemeines zu elegant	8
3.2	Simulation einer Phasenraumellipse	8
3.3	Erzeugen einer Separatrix	8
3.4	Simultane Extraktion in elegant	9
4	Vorbereitende Messungen	17
4.1	Messung der E3 Elektronenrate in Abhängigkeit verschiedener Einstellungen . .	17
4.2	Verwenden von Beulen der Teilchenbahn für E3 Extraktion	18
5	Simultane Extraktion	20
5.1	Erste simultane Extraktion	20
5.2	Strahlsteuerung in E3 Strahlführung	26
6	Ergebnisse und Ausblick	29
7	Anhang	31
	Abbildungsverzeichnis	34

1 Einleitung

Das Physikalische Institut der Universität Bonn betreibt die dreistufige Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA. Mit dieser können polarisierte und unpolarisierte Elektronen auf Energien von 0,5 GeV bis 3,2 GeV beschleunigt werden. Die Elektronen durchlaufen dabei die drei Stufen von ELSA und werden anschließend zu einem der beiden Experimentierplätze extrahiert. Dort kann dann das Experiment mit dem zur Verfügung gestellten Elektronenstrahl durchgeführt werden. Beim Experimentierplatz 1 und 2 (E1/E2) sind die beiden Haupt-Experimente aufgebaut. Das Crystal Barrel (CB) und das BGOOD Experiment benötigen lange Strahlzeiten und eine möglichst hohe Rate an Elektronen. Beim Experimentierplatz 3 (E3) hingegen werden Detektortests durchgeführt. Diese benötigen meist, im Vergleich zu den Haupt-Experimenten, geringe Elektronenraten.

Simultane Extraktion bedeutet, dass Detektortests und Haupt-Experimente gleichzeitig durchgeführt werden, indem ein Hauptteil der Elektronen zu E1/E2 und ein kleiner Anteil zu E3 extrahiert wird. Hierbei ist es das Ziel, den Elektronen-Strahl weitgehend unberührt zu lassen und trotzdem nahe genug an das Septum bei E3 zu bringen, dass dort Elektronen extrahiert werden können. Welche Raten sind dabei möglich und welche Verluste müssen womöglich in Kauf genommen werden? Auch war vor Beginn dieser Arbeit unklar, ob die Hauptexperimente überhaupt mit einer solchen Doppelextraktion betrieben werden können, da dort eine hohe Strahlstabilität benötigt wird.

Die simultane Extraktion bietet die Möglichkeit, Strahlzeiten effizienter zu nutzen und gegebenenfalls zu reduzieren. So können der hohe Stromverbrauch und die damit verbundenen Stromkosten verringert werden.

In dieser Arbeit wird untersucht, inwieweit eine simultane Extraktion an ELSA möglich ist und welche Kompromisse damit verbunden sind. Dazu werden Simulationen unter Verwendung der Software `elegant`[2] durchgeführt, um ein besseres Verständnis der Strahldynamik zu erlangen und den Einfluss verschiedener Komponenten zu untersuchen. Außerdem können mithilfe der Simulationen Einstellungen und Konzepte für den realen Strahlbetrieb getestet werden. Das erfolgreiche Durchführen einer simultanen Extraktion sowie dessen Untersuchung und Weiterentwicklung ist das Ziel dieser Arbeit.

2 Theoretischer Hintergrund

Zum Verständnis dieser Arbeit werden zunächst grundlegende Konzepte der Beschleunigerphysik erläutert.

2.1 Koordinatensystem im Beschleuniger

Um die genaue Position in einem Beschleuniger zu definieren, benötigt man ein Koordinatensystem. Für das verwendete Simulationsprogramm `elegant`[2] sieht dieses wie folgt aus:

- x Koordinate für die relative horizontale Position im Beschleuniger
- y Koordinate für die relative vertikale Position im Beschleuniger
- s Koordinate für longitudinale Position entlang des Beschleunigers

Wichtig ist hier, dass es sich bei x und y nur um relativ Koordinaten zu einem idealen Orbit handelt. Somit ist es möglich, die Position eines Teilchens im Beschleuniger exakt anzugeben. Um die Bewegung eines Teilchens im Beschleuniger zu beschreiben, werden zusätzlich für jedes Teilchen die horizontale Winkelablage $x' = \frac{dx(s)}{ds}$ sowie die vertikale Winkelablage $y' = \frac{dy(s)}{ds}$ definiert. Des Weiteren benötigt `elegant`[2] die relative Abweichung des Impulses vom Anfangsimpuls $\frac{\Delta p}{p_0}$. Somit wird eine Teilchenbewegung durch einen sechsdimensionalen Vektor beschrieben.

2.2 Grundbegriffe der Beschleunigerphysik

2.2.1 Emittanz

Die Emittanz ϵ beschreibt die Ausdehnung eines Teilchenstrahles im Phasenraum, also beispielsweise der Raum, der von x bzw. x' (horizontaler Phasenraum) aufgezogen wird. Je kleiner die Emittanz, desto besser kann der Strahl fokussiert werden. Somit ist die Emittanz ein Maß für die Strahlqualität [14].

2.2.2 Courant-Snyder Invariante

Ein Teilchen, das ohne longitudinale Beschleunigung (wichtig ist hier, dass nur konservative Kraftfelder und auch keine nicht lineare Feldanteile wie Sextupolfelder wirken) im Beschleuniger (Synchrotron) zirkuliert wird für viele Umläufe eine elliptische Form zeigen, wenn man dessen Position im Phasenraum immer an der selben Stelle s misst. Die Fläche $F = \pi A^2$ dieser Ellipse ist unabhängig von der Position s im Beschleuniger. A^2 ist dabei die Courant-Snyder-Invariante [14], die allein von den Anfangsbedingungen des Teilchens sowie der Optik des Synchrotron abhängt.

2.2.3 Arbeitspunkt

Der Arbeitspunkt Q_i beschreibt die Anzahl der Oszillationen eines Teilchens in einer Ebene i des Beschleunigers bei einem Umlauf. Man unterscheidet zwischen dem horizontalen Arbeitspunkt Q_x und dem vertikalen Arbeitspunkt Q_y ¹ [14]. Für die Extraktion ist besonders der horizontale Arbeitspunkt wichtig. Der Arbeitspunkt wird allein durch die Magnetoptik des Beschleunigers definiert und wird auch beispielsweise während der Extraktion verändert.

¹Es gibt auch einen longitudinalen Arbeitspunkt, der in dieser Arbeit aber nicht behandelt wird.

2.2.4 Optische Resonanzen

Optische Resonanzen beschreiben Bereiche für die Arbeitspunkte Q_x und Q_y , in denen der Strahl instabil wird und nach mehreren Umläufen verloren geht. Diese Resonanzen werden durch Fehler (oder auch gezielt) in den Magnetfeldern verursacht. Dipolmagneten erzeugen eine ganzzahlige Resonanzen, Quadrupolmagneten eine halbzahlige und Sextupolmagneten, in Kombination mit Dipolen, eine drittelzahlige Resonanz [14].

Bei einem Arbeitspunkt nahe einer ganzzahligen Resonanz führt ein Fehler (oder gezielte Abweichung) im Dipolmagneten zu einer Änderung der Amplitude bei jedem Umlauf. Diese Änderungen addieren sich auf, da sie aufgrund des ganzzahligen Arbeitspunktes immer zur selben Phase auftreten. Dies führt zu einer fortlaufenden Verstärkung der Schwingungsamplitude und schließlich zu einer Verschlechterung der Strahlqualität und einem Strahlverlust. Ebenso verursachen halbzahlige und drittelzahlige Resonanzen ähnliche Instabilitäten, wobei diese bei halb- bzw. drittelzahligen Arbeitspunkten auftreten.

Bei ELSA wird die drittelzahlige Resonanz $Q_x = 4\frac{2}{3}$ für das Extrahieren von Teilchen nach dem Prinzip der Resonanzextraktion verwendet. Hier sorgen die Extraktionssextupole für die Verformung des Phasenraumes zu einer Separatrix (vgl. Abschnitt 2.3.3).

2.3 Beschleunigeranlage ELSA

Die Extraktionssepta zu $E1/E2^2$ und $E3$ liegen im Speicherring exakt gegenüber voneinander. Es gibt vier Luft-Quadrupole (LQ), die während der Extraktion hochgefahren werden, um den Arbeitspunkt näher zur Resonanz zu schieben. Außerdem gibt es vier Extraktionssextupole, welche bei der Extraktion eine Verzerrung des Phasenraums zu einer sogenannten Separatrix (vgl. Abschnitt 2.3.3) bewirken.

2.3.1 Crystal Barrel Experiment

Im $E1$ Bereich wird derzeit das Experiment Crystal Barrel durchgeführt. In dieser Arbeit wird bei der simultanen Extraktion meist die Rede davon sein, nach CB und $E3$ zu extrahieren. Selbstverständlich ist eine simultane Extraktion auch nach BGOOD und $E3$ möglich. Jedoch wurde der während dieser Arbeit beispielhaft nur die Doppelextraktion nach CB und $E3$ getestet³. Das Crystal Barrel Experiment befasst sich mit der Untersuchung von photoproduzierten Reaktionen an Nukleonen. Im Zentrum davon steht der Crystal Barrel Detektor, welcher aus 1380 CsI(Tl)-Kristallen besteht. In diesem erzeugen Photonen, die bei den Reaktionen von Elektronen im Experiment entstehen, Licht welches proportional zu ihrer Energie ist [1]. Dafür ist eine hohe Elektronen-Rate nötig, um auch unwahrscheinliche Reaktionen adäquat abbilden zu können. Außerdem hat es hohe Anforderungen an die Stabilität der Strahls.

Um nach $E1$ zu extrahieren, wird ein Teil des Strahls zunächst durch das Vorseptum MSE22 vom Rest des Strahls getrennt und dann vom Hauptseptum MSE23 in die Extraktionsbeamline gelenkt. Dort kann die Position des Strahls vom Lagecavity oder einer Photonkamera gemessen werden.

2.3.2 Externe Beamline für Detektortests

Bei $E3$ werden unter anderem Detektor-Tests durchgeführt. Dafür reicht je nach Detektortest auch eine geringe Rate an Elektronen. Erneut wird ein kleiner Teil des Strahls am Vorseptum MSE6 vom Rest des Strahles getrennt und vom Hauptseptum MSE7 in die Externe Strahlführung abgelenkt. Es wird an dieser Stelle etwas genauer auf die Elemente der $E3$ Strahlführung eingegangen, da einige davon an anderer Stelle in dieser Arbeit nochmal relevant werden. In der Strahlführung (Abbildung

² $E1$ und $E2$ haben die gleichen Extraktionssepta.

³Kurz vor Abschluss dieser Arbeit wurde die erste Strahlzeit mit erfolgreicher simultaner Extraktion nach BGOOD und $E3$ gestartet.

Elektronen-Stretcher-Anlage (ELSA)

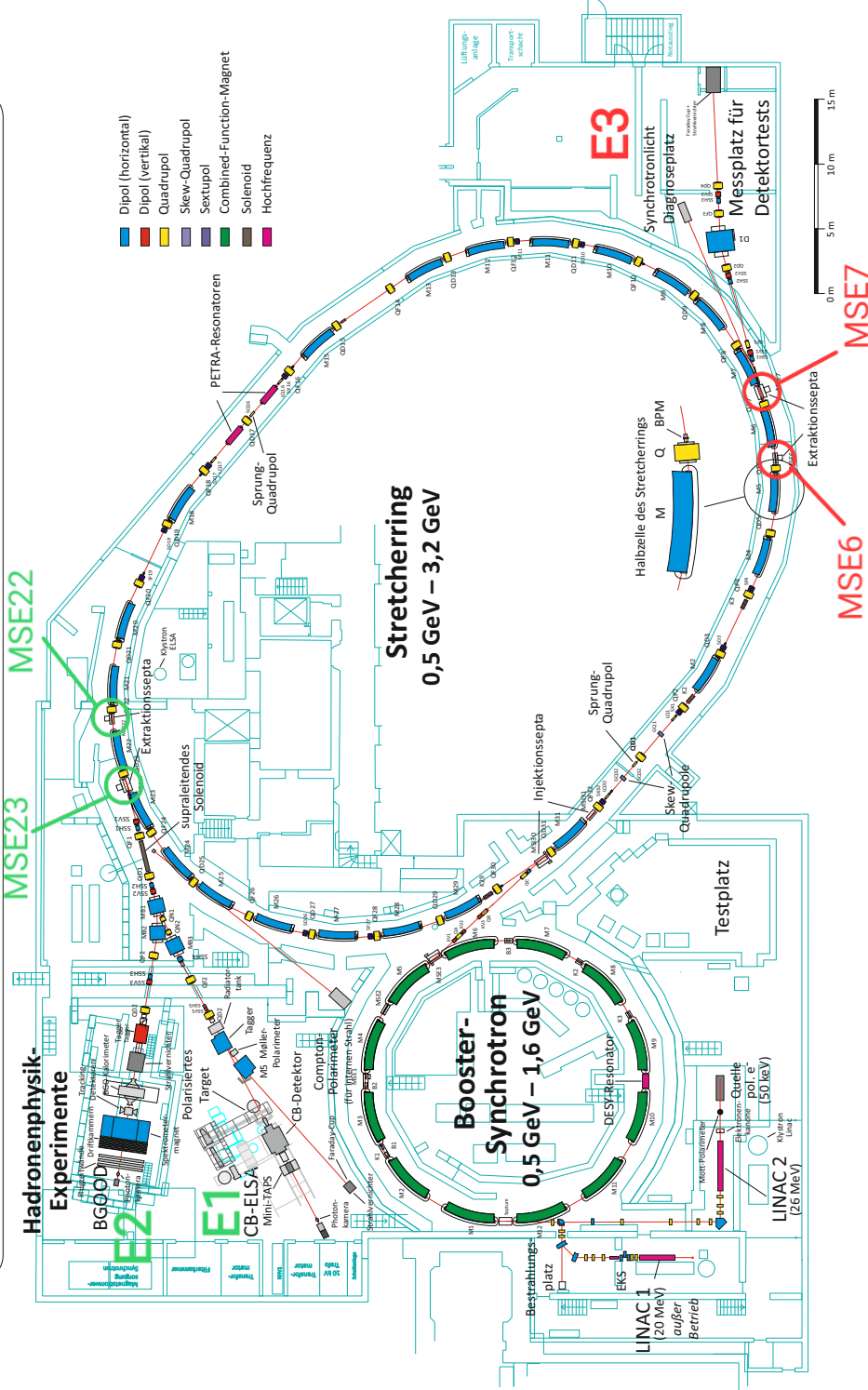


Abbildung 2.1: Grundriss der Elektronen-Strecher-Anlage ELSA mit eingezeichneten Experimentierplätzen.

2.2) befinden sich Strahlschieber (SSV für vertikal und SSH für horizontal), die die Strahlposition korrigieren können. Außerdem können Chromox Schirme (S) eingefahren werden um die Position und das Profil des Strahls an verschiedenen Stellen messen zu können. Die Schirme bestehen aus mit Chrom dotiertem Aluminiumoxid, das luminesziert, wenn es mit Elektronen bestrahlt wird. Dies kann über eine Digitalkamera beobachtet werden [13]. An die aufgenommenen Strahlbilder werden zweidimensionale Gauß-Profile angepasst [7] um die exakte Position des Strahls auf dem Schirm zu extrahieren.

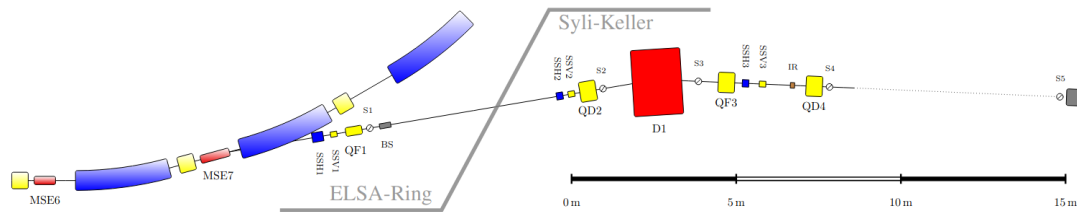


Abbildung 2.2: Die externe Strahlführung für Detektortests an der Beschleunigeranlage ELSA der Universität Bonn. Die Bezeichnungen sind wie folgt gewählt: MSE6 und MSE7 sind das Vor- und Haupt- Septum, QF und QD bezeichnen die fokussierenden bzw. defokussierenden Quadrupole, D1 ist ein Dipolmagnet, SSV und SSH sind die Strahlschieber in vertikaler und horizontaler Ebene, S bezeichnet einfahrbare Chromox-Schirme, IR den Intensitätsresonator und BS (englisch: beamshutter) dem Strahlvernichter. [10]

2.3.3 Resonanzextraktion

Um einen Teilchenstrahl aus einem Beschleuniger zu extrahieren, gibt es mehrere Verfahren. Ein Verfahren davon ist die Resonanzextraktion. Diese Methode erlaubt es, einen gleichmäßigen Strom über längere Zeit hinweg zu extrahieren. Dazu wird der horizontale Tune mit Hilfe von Luft-Quadrupolen an eine drittelzahlige Resonanz geschoben. Im Fall von ELSA liegt diese bei $Q_x = 4\frac{2}{3}$. Gleichzeitig werden die Extraktionssextupole (bei ELSA vier Stück) eingeschaltet. Die Sextupole verzerren den Phasenraum zu einer Dreiecksform, dadurch bildet sich die sogenannte Separatrix. Durch das Schieben des horizontalen Arbeitspunktes an die Resonanz werden die Teilchen instabil und wandern auf den Separatrix-Ästen nach außen. Durch die drittelzahlige Resonanz erhalten die Teilchen alle drei Umläufe eine größere Ablage in horizontaler Ebene. Je weiter das Teilchen auf den Ästen wandert, desto größer werden auch die Schritte alle drei Umläufe. Schließlich ist es möglich, Teilchen über die Schneide des Septummagneten zu schieben. Diese Schneide, schirmt das Feld, das die extrahierten Teilchen ablenken soll ab, wodurch diese davon (bis auf Randfelder die sich nicht vermeiden lassen) unberührt bleiben. Dadurch werden die Teilchen mit genügend großer Ablage vom Rest der Teilchen getrennt und können extrahiert werden [11]. Das Funktionsprinzip der Resonanzextraktion anhand des horizontalen Phasenraums ist in Abbildung 2.3 dargestellt.

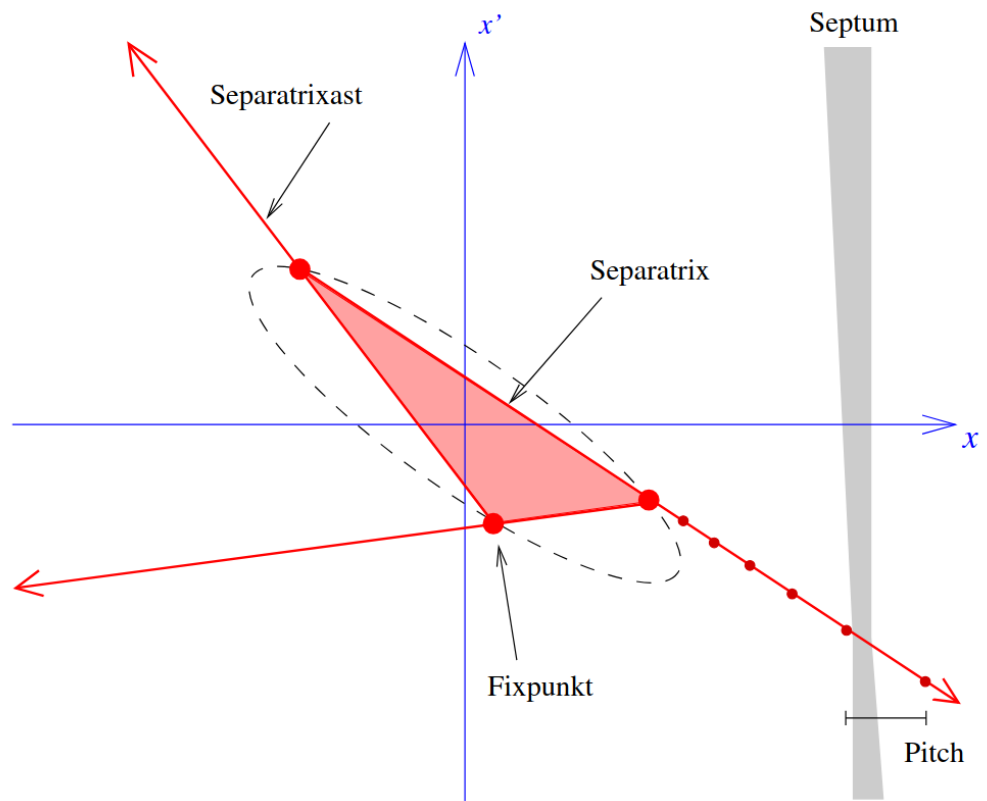


Abbildung 2.3: Funktionsprinzip Resonanzextraktion bei drittelzahliger Resonanz. [5]

3 Simulationen der Strahldynamik mit elegant

3.1 Allgemeines zu elegant

elegant (ELEctron Generation ANd Tracking)[2] ist eine Software zur Simulation von Teilchenstrahlen innerhalb eines Beschleunigers. Unter anderem können einzelne Teilchen aber auch große Ansammlungen von Teilchen in Teilchenpaketen simuliert und ihr Verhalten im Beschleuniger analysiert werden. Besonders diese Funktion wurde sich in dieser Arbeit zu Nutze gemacht.

Für eine Simulation in elegant[2] werden zwei Dateien benötigt. Die sogenannte Command-Datei (.ele) enthält die Anweisungen für die Simulation. Beispielsweise kann man hier globale Einstellungen vornehmen und die Teilchen-Art und Anzahl angeben. Das zweite angesprochene Dokument ist die Lattice-Datei (.lte). Dieses enthält eine Beschreibung der Optik des zu simulierenden Beschleunigers. Es gibt eine Vielzahl von Elementen mit verschiedenen Eigenschaften und Einstellmöglichkeiten aus denen man wählen kann. Die Lattice-Datei von ELSA sowie der E3-Strahlführung existierten bereits und wurden in dieser Arbeit verwendet.

elegant[2] verwendet als Eingabe- und Ausgabe-Dateien das Dateiformat SDDS (Self-Describing Data Set). Dieses ist in der Wissenschaft und besonders in der Teilchenphysik sehr verbreitet, da es einem ermöglicht, große Datenmengen präzise zu verwalten. Der Vorteil dieses Dateiformats ist es, dass jegliche Metadaten wie Struktur, Datentyp und Einheit der gespeicherten Größe in der Datei selbst enthalten sind[2]. Um die Daten weiterverarbeiten zu können (z. B. mit Python), werden diese zunächst in andere Dateiformate umgewandelt. Häufig werden dabei .ascii- oder .txt-Dateien verwendet.

3.2 Simulation einer Phasenraumellipse

Für eine Simulation der Phasenraumellipse, wird ein Teilchen an einer Stelle im Beschleuniger betrachtet. Seine Positionen im Phasenraum für mehrere Umläufe bilden eine Ellipse (vgl. 2.2.2) die auch als Phasenraumellipse bezeichnet wird. Da Sextupole nicht lineare Felder erzeugen, verzerren sie die Ellipse und werden deshalb bei dieser Simulation ausgeschaltet. Auch Synchrotronstrahlung wird hier nicht berücksichtigt, da diese durch Teilchenenergiefluktuationen die Bewegung der Teilchen ändert, was zu Abweichungen von der Ellipse führt. Abbildung 3.1 zeigt die Phasenraumellipsen von fünf Teilchen, die mit unterschiedlichen Offsets simuliert werden. Die Größe dieser Ellipse lässt sich durch den am Anfang gegebenen Offset des Teilchens variieren die Fläche die von der Ellipse eingeschlossen wird ist, ist proportional zur Courant-Snyder Invariante A^2 und somit für alle Positionen im Beschleuniger gleich (vgl. 2.2.2).

3.3 Erzeugen einer Separatrix

Um die bei der Resonanzextraktion verwendete Separatrix im horizontalen Phasenraum zu erzeugen, werden die Extraktionsseptupole sowie die Luft-Quadrupole eingeschaltet. Deren Werte können aus dem aktuellen Extraktions-Modell aus dem Kontrollsystem von ELSA entnommen werden, da diese Parameter sind der Realität am nächsten sind. Bei ELSA werden die Luft-Quadrupole (LQ) dazu verwendet den horizontalen Arbeitspunkt näher zur Resonanz $4\frac{2}{3}$ zu schieben. Dadurch werden mehr und mehr Teilchen instabil und wandern auf den Separatrix-Ästen nach außen.

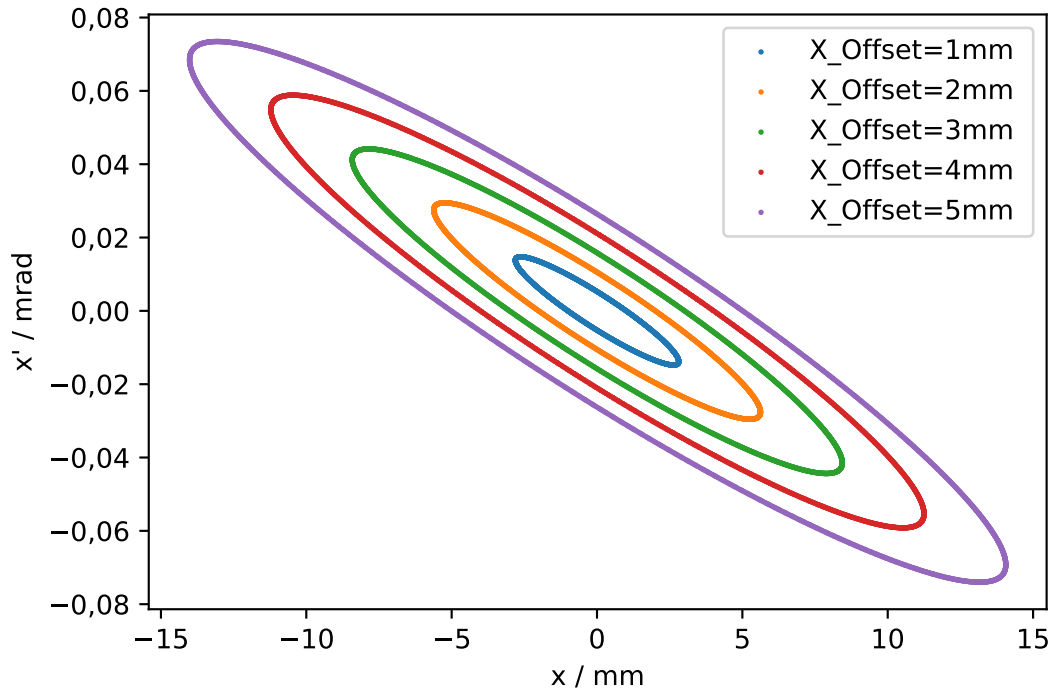


Abbildung 3.1: Phasenraumellipse am MSE6 bei 2000 Umläufen für 5 Teilchen mit verschiedenen horizontalen Offsets.

In der Simulation wurde hier zunächst eine konstante (Luft-)Quadrupolstärke verwendet, bis die Resonanz gut genug getroffen wurde. Das Ergebnis davon ist in Abbildung 3.2 zu sehen.

Man kann erkennen, dass je größer die Ablage des beobachteten Teilchens ist, desto mehr wird die Ellipse zu einer Separatrix verformt, bis die Teilchenbahn instabil wird und das Teilchen auf den Separatrix-Ästen verloren geht/extrahiert wird. Man sieht auch, dass die Ablagezunahme größer wird, je weiter das Teilchen auf den Separatrix-Ästen nach außen gewandert ist. Um die Extraktion des Teilchens zu gewährleisten, wird die Septumschneide so positioniert, dass das Teilchen bei einem Umlauf knapp davor vorbeiläuft und nach drei (drittelzahlige Resonanz) weiteren Umläufen die Schneide passiert. Somit wird das Teilchen extrahiert und der umlaufende stabile Teil des Strahls bleibt weitestgehend unberührt.

3.4 Simultane Extraktion in elegant

Als Vorbereitung für die erste simultane Extraktion wurde diese in `elegant`[2] simuliert. Die Struktur des Codes lautet wie folgt¹: Eine Simulation in ELSA in Nähe der Resonanz wird durchgeführt, um durch Resonanzextraktion Teilchen aus ELSA zu extrahieren. Dazu wurde eine Rampe programmiert, die die Luft-Quadrupolstärke über eine einstellbare Anzahl an Umläufen linear erhöht. Dadurch wird der horizontale Arbeitspunkt² näher an die Resonanz geschoben, was eine langsame und gleichmäßige Strahlextraktion sicherstellen soll. Die Septumschneide am MSE6 und am MSE22 wird als „Schwelle“ simuliert. Alle Teilchen die eine Ablage größer als ein definierter Wert haben, gehen an dieser „Schwelle“ verloren. Die verlorengegangenen Teilchen werden in einer lost-Datei (.los) mit ihrer ParticleID sowie der longitudinalen Position im Beschleuniger an der sie verloren gegangen sind abgespeichert. Die Datei wird mit Python eingelesen und alle Teilchen die an der longitudinalen Position vom MSE6 ($s=26,427\text{ m}$)³ und MSE22 ($s=108,584\text{ m}$) verloren

¹Hier wurde Teile des Python-Codes von Leonardo Thome und Kilian Kranz verwendet.

²Der vertikale Arbeitspunkt wird auch durch die Luft-Quadrupole verschoben, aber nicht zu einer Resonanz hin

³ $s=0\text{ m}$ entspricht hier dem Übergang vom Boostersynchrotron in den Streherring 2.1.

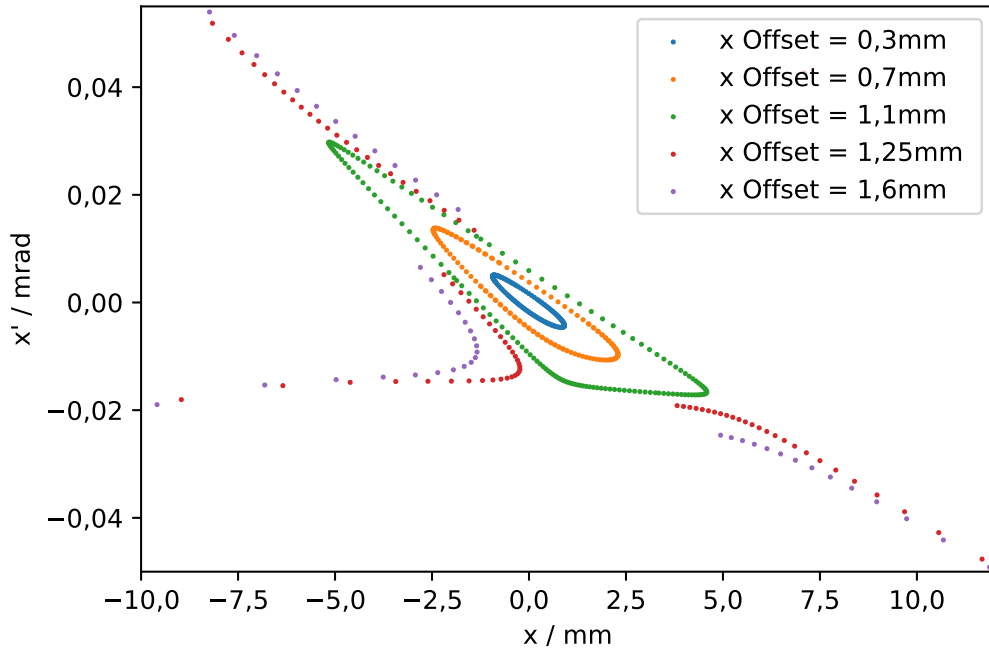


Abbildung 3.2: Bildung einer Separatrix im horizontalen Phasenraum von ELSA bei einem Q_x von 4,6628 für verschiedene x Ablagen beim Vorseptum MSE6. Hier wurden für die Extraktions-Sextupolstärke $1,2 \text{ m}^{-3}$ und als Luft-Quadrupolstärke $0,0175 \text{ m}^{-2}$ verwendet.

gegangen sind werden mit ihrer ParticleID und dem Umlauf in dem sie verloren gegangen sind gespeichert. Des Weiteren sind an den beiden Septa Monitore platziert, die Watch-Dateien erstellen. In diesen werden bei jedem Umlauf alle Teilchen mit Position und ID gespeichert. Nun weiß man welche Teilchen in welchem Umlauf wo verlorengegangen sind und kann die exakten Koordinaten durch Abgleich der ParticleID in eine neue Watch-Datei abspeichern. Die Watch-Datei mit den Teilchen die am MSE6 verloren gegangen sind kann dann direkt in die E3 Strahlführung als Eingabedatei verwendet werden, mit der der Durchlauf durch E3 simuliert werden kann.

Es wurden verschiedene Simulationen durchgeführt, um möglichst realistische Ergebnisse zu erzielen. Da im Kontrollsystem keine Luftquadrupolstärke (k) angegeben ist, sondern nur der Strom, der notwendig ist, um die Luft-Quadrupole zu betreiben, musste zunächst der Umrechnungsfaktor bestimmt werden. Die dafür nötigen Informationen wurden aus [3] entnommen. Mit den Kenntnissen darüber, wie sich der Arbeitspunkt in Abhängigkeit des Stroms der Luft-Quadrupole ändert, konnte in der Simulation abgeglichen werden, welche Luft-Quadrupol-Stärke-Änderung notwendig ist, um die selbe Änderung im Arbeitspunkt zu erhalten. Somit erhält man den Umrechnungsfaktor von Strom zu LQ-Stärke. Das funktioniert nur für kleine Änderungen der LQ-Stärke, in denen die Änderung des Arbeitspunktes in Abhängigkeit der LQ-Stärke als linear angesehen werden kann. Allgemein ist diese Abhängigkeit allerdings nicht linear.

Die Änderung des LQ-Stroms um 150 A erzeugt eine Änderung des Arbeitspunktes von $\Delta Q_x = 0,00995$ [3]. Um in der Simulation dieselbe Änderung des Arbeitspunktes zu erzeugen, muss eine Änderung der Luft-Quadrupol-Stärke von $\Delta k_{LQ} = 0,0052368 \text{ m}^{-2}$. Somit ergibt sich ein Umrechnungsfaktor $\sigma = 3,4912 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-2} \text{ A}^{-1}$.

Aufgrund der limitierten Rechenleistung können nur begrenzte Teilchenzahlen und Umläufe simuliert werden. Das gefundene Maximum bei vertretbarer Simulationszeit beträgt 100 000 Teilchen mit 1000 Umläufen. Dadurch deckt man jedoch nur einen sehr kleinen Teil der eigentlichen Extraktion ab, die, beispielsweise für eine Extraktionszeit von ca. 6 s, bei ca. $1,1 \cdot 10^7$ Umläufen liegt. Somit deckt die Simulation nicht einmal 0,01 % der Extraktion ab. Deshalb muss, um eine adäquate

Anzahl an Teilchen zu extrahieren, der horizontale Tune deutlich näher an die Resonanz geschoben werden. Hier wurde intensiv versucht eine geeignete LQ-Stärke zu finden, bei der in der Anzahl an Umläufen auch eine vertretbare Anzahl an Teilchen verloren geht. Zusätzlich wurde versucht eine geeignete Rampe der LQ-Stärke zu finden, bei der ein konstanter Teilchenstrom extrahiert werden kann. Außerdem wurde mit Hilfe der Positionen der Septa versucht ein realistisches Verhältnis von extrahierten Teilchen am MSE6 und MSE22 zu erzielen. Auch wurde ein Teil der Simulationen mit Berücksichtigung der Synchrotronstrahlung durchgeführt. Hier mussten noch die Cavities Petra 1 und 2 dazugeschaltet werden um den Energieverlust der Teilchen durch Synchrotronstrahlung entgegenzuwirken. Es wurde unter Verwendung der Formel [8]:

$$P_{\text{verlust}}[\text{keV}] \approx \frac{88,5 \cdot E^4[\text{GeV}]}{R[\text{m}]} \quad (3.1)$$

die mittlere Verlustleistung ⁴ pro Umlauf bei ELSA berechnet, wobei R Ablenkradius, und E die Energie der Elektronen ist. Bei ELSA gilt $R = 10,88 \text{ m}$ [9]. Für E wurde die Maximalenergie von ELSA (3,2 GeV), bei der jegliche Simulationen durchgeführt wurden verwendet. Damit ergibt sich Energieverlust pro Teilchen durch Synchrotronstrahlung von 852,93 keV. Da die Teilchen auf der fallenden Flanke (relativistische Teilchen) der sinusförmigen Beschleunigungsspannung der Cavities liegen und nicht die maximale Amplitude sehen, braucht man deutlich höhere Amplituden um die Verluste durch Synchrotronstrahlung ausgleichen zu können. Es wird eine Beschleunigungsspannung von insgesamt 2,545 MV benötigt, um den Impuls der Teilchen konstant zu halten und longitudinale Strahlfokussierung zu gewährleisten.

3.4.1 Simulation der Simultanen Extraktion ohne Synchrotronstrahlung

Zunächst wurden Simulationen der Simultanen Extraktion ohne Synchrotronstrahlung durchgeführt. Dazu wurde das Septum des MSE6 auf 14 mm und das MSE22 auf 13 mm Abstand vom Mittelpunkt des Stahlrohrs gestellt. Außerdem wurde eine Quadrupolrampe erstellt, die innerhalb der ersten 300 Umläufe die Quadrupolstärke von $0,0100 \text{ m}^{-2}$ linear auf $0,0175 \text{ m}^{-2}$ erhöht. Dadurch wird der Arbeitspunkt nahezu linear (da Δk klein, allgemein ist der Zusammenhang nicht linear) von 4,6487 auf 4,6628 geschoben. Es wurden 100 000 Teilchen über 1000 Umläufe beobachtet. Insgesamt wurden von den 100 000 Teilchen 58 264 am MSE22 und 1203 am MSE6 extrahiert. Der jeweiligen Phasenraum der extrahierten Teilchen an den beiden Septa ist in Abbildung 3.3 für das MSE6 und in 3.4 für das MSE22 gezeigt. Hier wurden jeweils die ersten 20 Umläufe nicht betrachtet, weil die Teilchen, die dort extrahiert werden, aufgrund ihrer zu Beginn bereits großen Amplitude extrahiert werden. Diese resultiert daraus, dass ein gaußförmiges Teilchenpaket als Input der Simulation erzeugt wird und dort auf den Flanken auch Teilchen mit hoher Ablage existieren. Diese werden aber hier nicht betrachtet, da diese nicht durch die Resonanzextraktion extrahiert wurden. Die ungefilterten Phasenräume sind im Anhang zu finden (Abbildung 7.1 und 7.2).

⁴Da die Abstrahlung von Synchrotronstrahlung ein stochastischer Prozess ist und dadurch fluktuiert.

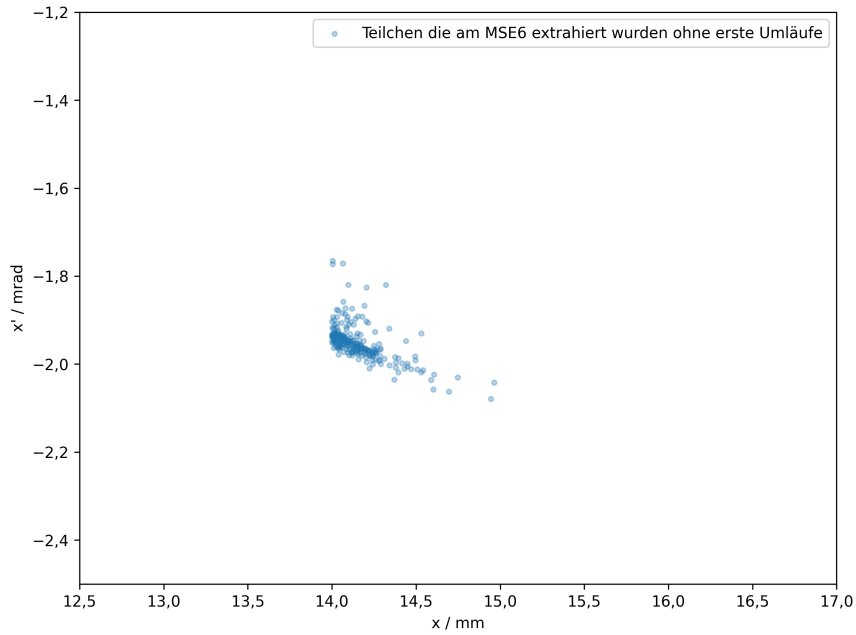


Abbildung 3.3: Phasenraum der am MSE6 extrahierten Teilchen ohne Synchrotronstrahlungs-Effekte und ohne erste Umläufe.

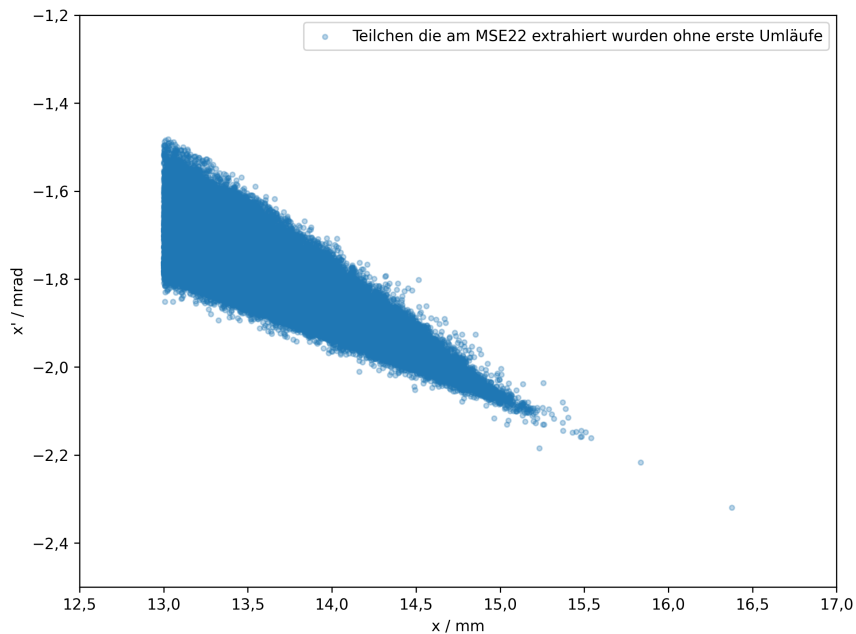


Abbildung 3.4: Phasenraum der am MSE22 extrahierten Teilchen ohne Synchrotronstrahlungs- Effekte und ohne erste Umläufe.

Man kann gut erkennen, an welcher Stelle die Septumschneide den Separatrix-Ast abtrennt. Wenn man die Phasenräume der gefilterten und ungefilterten Daten vergleicht, sieht man, dass bei Umlauf 20 die Teilchenwolke um die eigentliche Struktur verschwunden und der Phasenraum dadurch deutlich schmäler geworden ist. Es ist durchaus realistischer einen Teilchenpaket zu verwenden der bereits gefiltert ist, da die Teilchen vor Extraktions-Start bei ELSA bereits einige (Größenordnung 10^6) Umläufe gemacht haben und dort jegliche solcher Teilchen verloren gegangen wären. Auch interessant ist es, sich anzuschauen in welchen Umläufen die Teilchen während der Extraktion

extrahiert werden. In Abbildung 3.5 ist ein Histogramm gezeigt, das die Anzahl der extrahierten Teilchen pro Umlauf darstellt. Auch die LQ-Rampe wurde dort zur Orientierung grafisch dargestellt. Auch hier wurde aus Gründen der Skalierung, der nullte Umlauf ausgelassen, da dort aufgrund der Größe des Teilchenpakets und der Position der Septumschneiden ein relativ großer Anteil verloren geht. Man sieht, dass nicht alle dieser Teilchen im ersten Umlauf verloren gehen und dadurch ein Maximum (dieses wurde beim Phasenraum aussortiert) bei den ersten Umläufen entsteht. Außerdem ist erkennbar, dass mit steigender LQ-Stärke auch eine höhere Anzahl an Teilchen pro Umlauf extrahiert werden. Das ist auch zu erwarten, da man den Arbeitspunkt näher an die Resonanz schiebt und dadurch mehr Teilchen instabil werden. Hier lässt sich ebenfalls eine Substruktur erkennen, deren detaillierte Erklärung jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich ist. Das ausgeprägte Maximum im Bereich von Umlauf 300, ist darauf zurückzuführen das eine große Menge an Teilchen gleichzeitig instabil wird. Das ist darauf zurückzuführen, dass man durch das Schieben des Arbeitspunktes zur Resonanz die Fläche der Separatrix (innerhalb der Teilchen stabil sind) verkleinert. Abbildung 3.6 zeigt dies schematisch. Da auf den stabilen Fixpunkten (Ecken des Dreiecks) die Teilchen langsamer laufen sind dort auch größere Teilchendichten (vgl. Abbildung 3.2) zu finden. Es sind diese Teilchen die das starke Maximum verursachen. Das Abfallen des Maximum sobald die maximale LQ-Stärke erreicht ist, kann dadurch erklärt werden, dass die Teilchen zwischen den Fixpunkten zuerst an der Seite der Separatrix entlanglaufen müssen, um schließlich extrahiert zu werden [4]. Natürlich überlagern diese Regionen sich hier, da man eine kontinuierliche Veränderung des Arbeitspunktes bis zum Umlauf 300 hat. Es wird deutlich, dass bei konstant gehaltener Quadrupolstärke, nachdem alle Teilchen auf und außerhalb der Separatrix extrahiert wurden, kein Teilchen mehr instabil wird. Das deckt sich mit den Erwartungen, da es ohne Synchrotronstrahlung für die Teilchen nicht möglich ist, die Separatrix zu überwinden⁵.

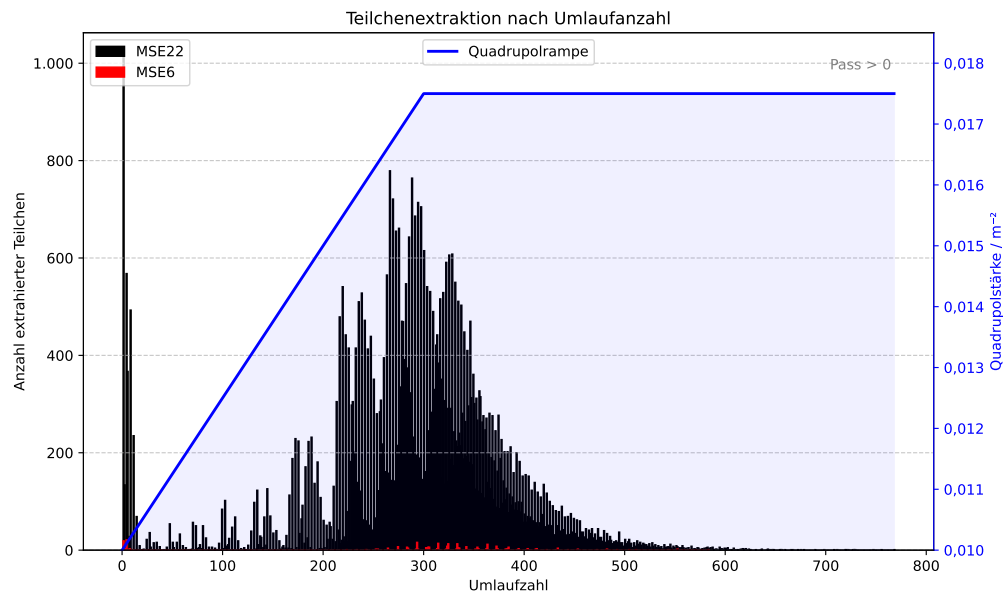


Abbildung 3.5: Histogramm, dass die Anzahl an extrahierten Teilchen, an den beiden Septa, pro Umlauf zeigt. Zusätzlich wurde auch die Quadrupolrampe in Abhängigkeit der Umläufe der Teilchen grafisch dargestellt. Dabei ist Synchrotronstrahlung deaktiviert.

⁵Durch strahlstromabhängige Arbeitspunktverschiebungen kann die Separatrix überwunden werden. Diese Effekte sind in der Simulation nicht berücksichtigt worden.

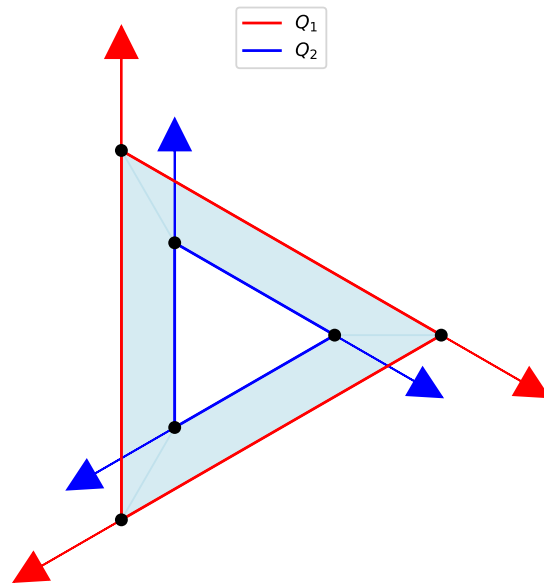


Abbildung 3.6: Veränderung der Separatrix (von rot nach blau) während Resonanzextraktion schematisch dargestellt. Q_1 ist dabei näher an der Resonanz als Q_2 . Die Fläche zwischen dem roten und blauen Dreieck enthält die Teilchen, die bei dem Ändern des Arbeitspunktes instabil werden.

3.4.2 Simulation der Simultanen Extraktion mit Synchrotronstrahlung

Nach dem Einschalten der Synchrotronstrahlung sowie der beiden Cavities Petra 1 und 2 wurde dieselbe Simulation wie zuvor durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass man deutlich mehr Teilchen extrahiert. Das liegt daran, dass die Abstrahlung von Synchrotronstrahlung die Emittanz vergrößert, da diese auch die vertikalen und horizontalen Impulse verändert. Dadurch werden stetig mehr Teilchen instabil, was zu erhöhter Extraktion führt. Um diesen Effekt zu kompensieren und ungefähr die selben Anteile an extrahierten Teilchen wie zuvor zu erhalten, wurden die Septa weiter nach außen gesetzt. Das MSE6 wurde auf 26 mm und das MSE22 auf 23 mm Abstand von der Strahlrohrmitte gestellt. Dadurch konnten, von den 100 000 Teilchen, 72 314 am MSE22 und 482 am MSE6 extrahiert werden. Der Phasenraum des MSE6 ist in Abbildung 3.7 und der des MSE22 in Abbildung 3.8 gezeigt. Hier wurden erneut die ersten 20 Umläufe ausgeschnitten. Allerdings sind diese Umläufe hier auch nicht so dominant wie in der Simulation ohne Synchrotronstrahlung. Die Phasenräume, inklusive der in den ersten 20 Umläufen extrahierten Teilchen, sind in Abbildung 7.3 für das MSE6 und 7.4 für das MSE22 im Anhang zu finden.

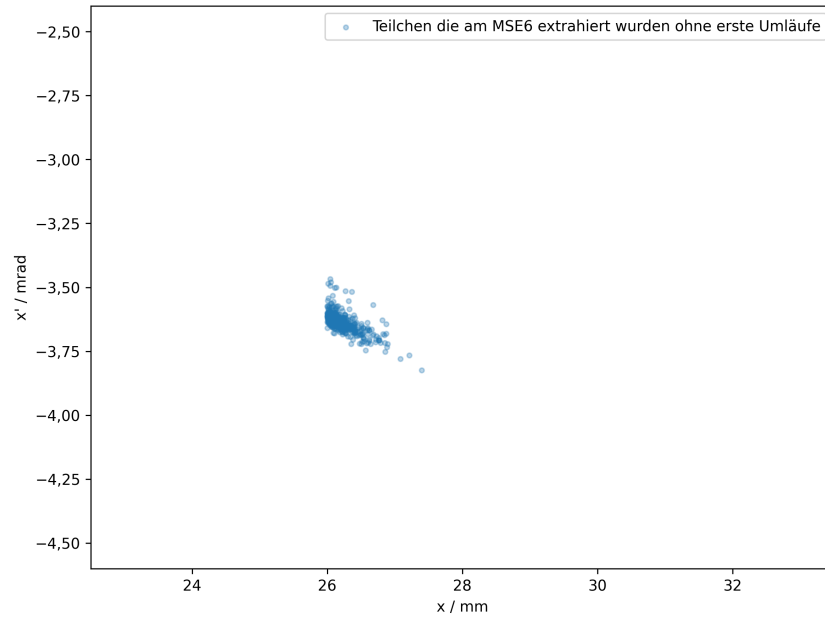


Abbildung 3.7: Phasenraum der am MSE6 extrahierten Teilchen ohne erste Umläufe und mit Berücksichtigung von Synchrotronstrahlung.

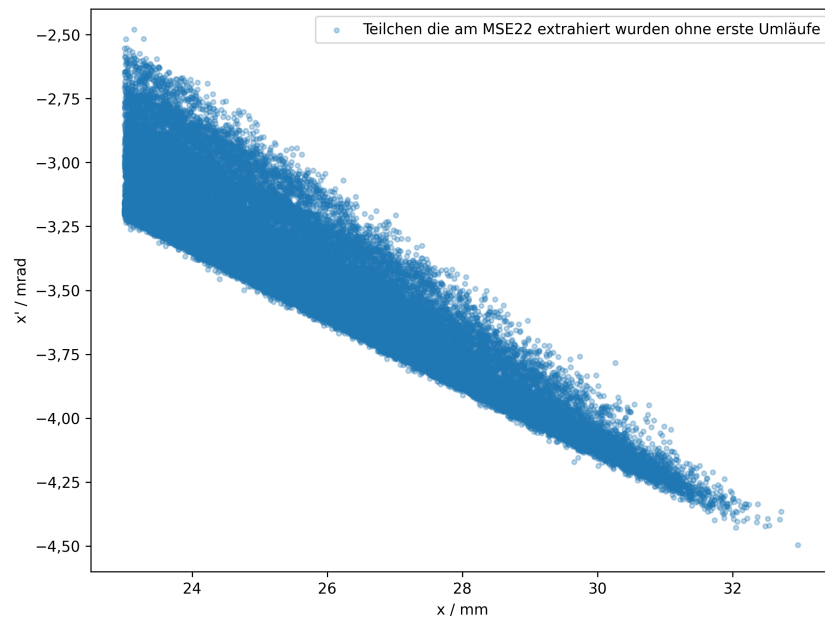


Abbildung 3.8: Phasenraum der am MSE22 extrahierten Teilchen ohne erste Umläufe und mit Berücksichtigung von Synchrotronstrahlung.

Insgesamt kann man gut erkennen, dass die Phasenräume der Simulation mit Synchrotronstrahlung ungefähr um den Faktor 2 größer sind. Die scharfe Kante, die im Phasenraum des MSE22 besonders auffällt und die Verteilung nach unten hin begrenzte, ist der Geometrie geschuldet. Diese gibt eine Bedingung vor, dass Teilchen mit einer Ablage x mindestens einen bestimmten Minimalwinkel aufweisen müssen um über die Septumschneide zu gelangen. In Abbildung 3.9 wird die Anzahl an extrahierten Teilchen pro Umlauf gezeigt. Man sieht, dass auch hier wieder

die Unterstruktur, die bereits in Abbildung 3.5 aufgetreten ist, deutlich wird. Der große Unterschied zwischen den beiden Abbildungen ist, dass man bei dem Verlauf mit Synchrotronstrahlung nach dem großen Maximum im Bereich um Umlauf 300 herum eine relativ konstante Anzahl an Elektronen bei beiden Septa extrahiert. Das lässt sich dadurch erklären, dass die Teilchen die ohne Synchrotronstrahlung nach der Quadrupolrampe im stabilen Bereich der Separatrix liegen durch Synchrotronstrahlung trotzdem instabil und dadurch extrahiert werden können. Das scharfe Maximum bei den ersten Teilchen bei der Extraktion ohne Synchrotronstrahlung (vgl. Abbildung 3.5) tritt bei der Extraktion mit Synchrotronstrahlung nur sehr schwach auf, da die Septa deutlich weiter außen stehen.

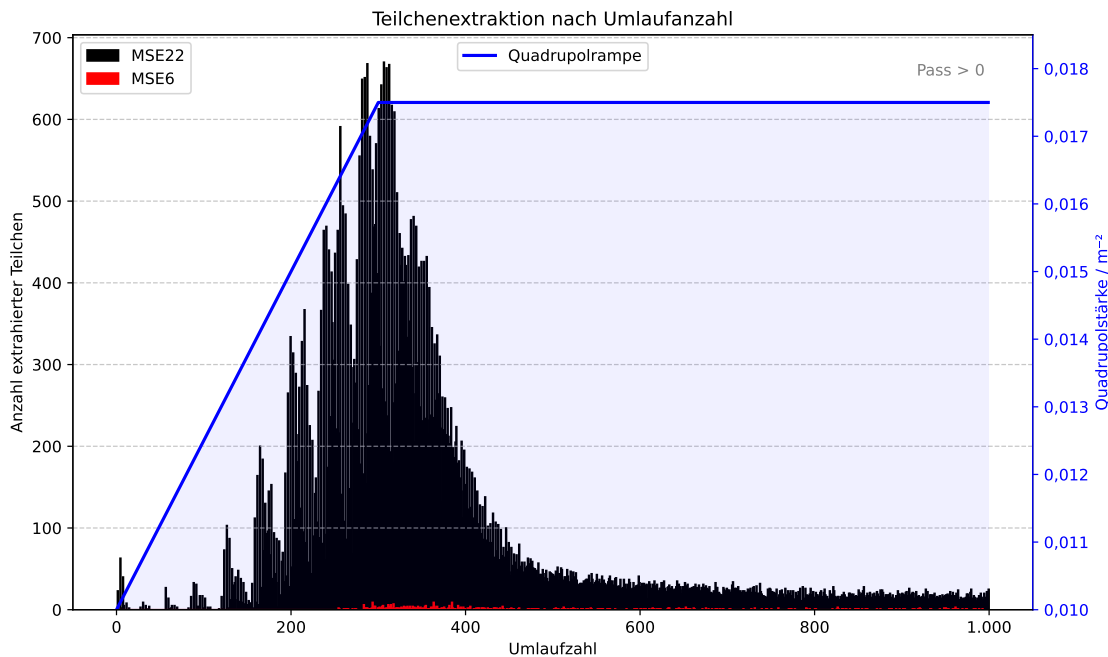


Abbildung 3.9: Histogramm, dass die Anzahl an extrahierten Teilchen, an den beiden Septa, pro Umlauf zeigt. Zusätzlich wurde auch die Quadrupolrampe in Abhängigkeit der Umläufe der Teilchen grafisch dargestellt. Dabei ist Synchrotronstrahlung aktiviert.

Mit Hilfe der Simulationen kann das Verhalten der Teilchen bei Simultaner Extraktion besser verstanden werden. Es gibt dennoch einige Effekte wie z. B. die Unterstruktur in den beiden Abbildungen 3.5 und 3.9, die nicht verstanden werden können und einer weiteren Analyse bedürfen.

4 Vorbereitende Messungen

Als weitere Vorbereitung für die simultane Extraktion wurde untersucht, wie sich geringe Raten zu E3 extrahieren lassen. Dabei wurden während Strahlextraktion für E3 Messungen durchgeführt.

4.1 Messung der E3 Elektronenrate in Abhängigkeit verschiedener Einstellungen

Um die Elektronenextraktionsrate an E3 messen zu können, wurde ein Szintillator mittig an das Ende des Strahlrohrs positioniert. Der Szintillator detektiert Elektronen, die auf ihn treffen, und gibt dieses Signal an eine Zählerkarte des Kontrollsystems weiter.

Es gibt zwei Ansätze, wie eine Simultane Extraktion umzusetzen ist. Zum einen kann die Septumschneide gerade so weit in die Nähe des gespeicherten Strahls gefahren werden, dass nur eine geringe Rate extrahiert wird. Eine andere Idee ist es, die Beulen-Funktion ¹ von ELSA zu verwenden und den Strahl lokal weiter an die Septum-Schneide zu schieben. Dadurch ließe sich die Extraktionsrate durch die Amplitude der Beuel kontrollieren. Diese Ideen wurden auf ihre Funktionalität und ihren Einfluss auf den Strahl bei CB untersucht.

4.1.1 Einfluss der Septumposition auf den zu E3 extrahierten Strahl

Für die Extraktion nach E3 wird die Septumschneide an den gespeicherten Strahl herangefahren. Daraufhin werden mehr Elektronen, nach dem Prinzip der Resonanzextraktion, extrahiert. Für die Septumschneide des MSE6 gibt einen Wertebereich von 0 mm bis 24 mm, wobei gilt, dass die Septumschneide bei einem größeren Wert weiter an den Strahl gefahren wird. Die exakte Position dieser im Strahlrohr in Abhängigkeit des Sollwertes im Kontrollsystem ist jedoch nicht bekannt². Die Messung der Elektronenrate in Abhängigkeit der Septumschneidenposition vom MSE6 ist in der Abbildung 4.1 grafisch dargestellt. Hier wird ein nahezu linearer Verlauf deutlich. Die Rate ist davon abhängig wie viele Elektronen aufgrund des Schiebens des Arbeitspunktes zur Resonanz instabil werden. Auf die zugrundeliegende komplexe Dynamik der Teilchen im Phasenraum soll hier nicht weiter eingegangen werden. Für die Fehler der Rate wurde eine Ablesegenauigkeit von 5 % verwendet. Für jede Einstellung muss der Strahlschieber mitjustiert werden, um das Maximum der Rate zu finden. Da die Rate nur einmal pro Zyklus bestimmt wird aktualisiert sie sich nur etwa alle 8 s. Aufgrund dieser Herausforderung ist die Ablesegenauigkeit deutlich größer als der statistische Fehler. Daher werden die übrigen Fehlerquellen vernachlässigt, und die Ablesegenauigkeit von 5 % wird als Gesamtfehler angenommen. Auf die Darstellung der Fehler für die Position der Septumschneide ist verzichtet worden. Es wird angenommen, dass diese sehr klein sind und da die Septumschneide nicht genügend genau eingestellt werden kann, irrelevant werden, da die exakt selbe Position schwer erneut zu erreichen ist. Es ist außerdem in Abbildung 4.1 nur die Tendenz wichtig, dass sich die Rate der extrahierten Elektronen vergrößern lässt, wenn die Schneide weiter hinein gefahren wird.

¹Die Beulen-Funktion[12] erzeugt, wie der Name schon sagt, eine Beule im geschlossenen Orbit. Dabei werden Korrektormagnete verwendet, um den Strahl zunächst gezielt vom Normal-Orbit abzulenken und anschließend wieder auf den ursprünglichen Orbit zurückzuführen. Idealerweise sollte der Orbit dabei geschlossen bleiben.

²Das Gleiche gilt für das MSE22, das einen Wertebereich von 10 mm („drinnen“) bis 30 mm („draußen“) besitzt.

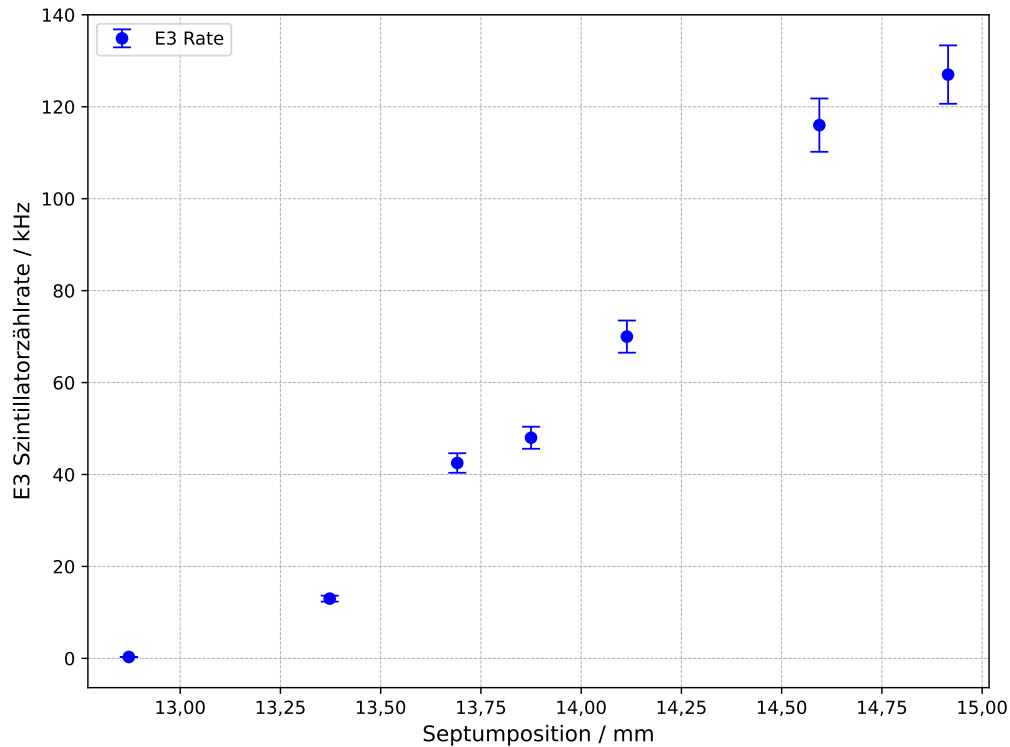


Abbildung 4.1: Einfluss der Position der Septumschneide des MSE6 auf die maximale bei E3 gemessene Szintillatorzählrate.

4.2 Verwenden von Beulen der Teilchenbahn für E3 Extraktion

Es wurde versucht, den Elektronen-Strahl nicht durch Verstellen des Septum MSE6 nach E3 zu extrahieren, sondern den Strahl selber näher an das Septum zu bringen und dadurch effektiv den selben Effekt zu erzielen. Dazu kann mithilfe der Strahlkorrektoren in ELSA eine lokale Gleichgewichtsbeule [12] erzeugt werden, die den Strahl innerhalb des Strahlrohr verschiebt. Idealerweise sollten die Korrektoren den Strahl danach wieder auf die ursprüngliche Bahn korrigieren, um den geschlossenen Orbit nicht zu stören. Diese Beulen-Funktion [12] war bereits im Kontrollsystem implementiert und konnte verwendet werden. Es kann die Position und die Größe der Beule ausgewählt werden, auch negative Beulen sind möglich. Die Einflüsse der Beulen auf die Elektronen-Rate des Szintillator am Target von E3 sind in Abbildung 4.2 zu sehen. Dabei wurde, wie auch bereits beim Septum, der SSH1 stetig nachkorrigiert um die Verschiebung des Strahls am Target zu berücksichtigen. Somit wird sichergestellt, dass der extrahierte Strahl den Szintillator trifft. Hier wurde, da man keine wirklich präzise Messung der tatsächlichen Beule im Orbit hat und nicht weiß wie groß diese ist, nur die Soll-Werte verwendet. Deshalb wird auf die Darstellung der Fehler für die Beule verzichtet und es wird erneut nur die Tendenz betrachtet. Die Rate bei E3 kann mit einer positiven Beule erhöht und mit einer negativen Beule verringert werden. Für den Fehler der Rate wird, nach der gleichen Argumentation wie bereits bei 4.1, ein Fehler von 5 % angenommen.

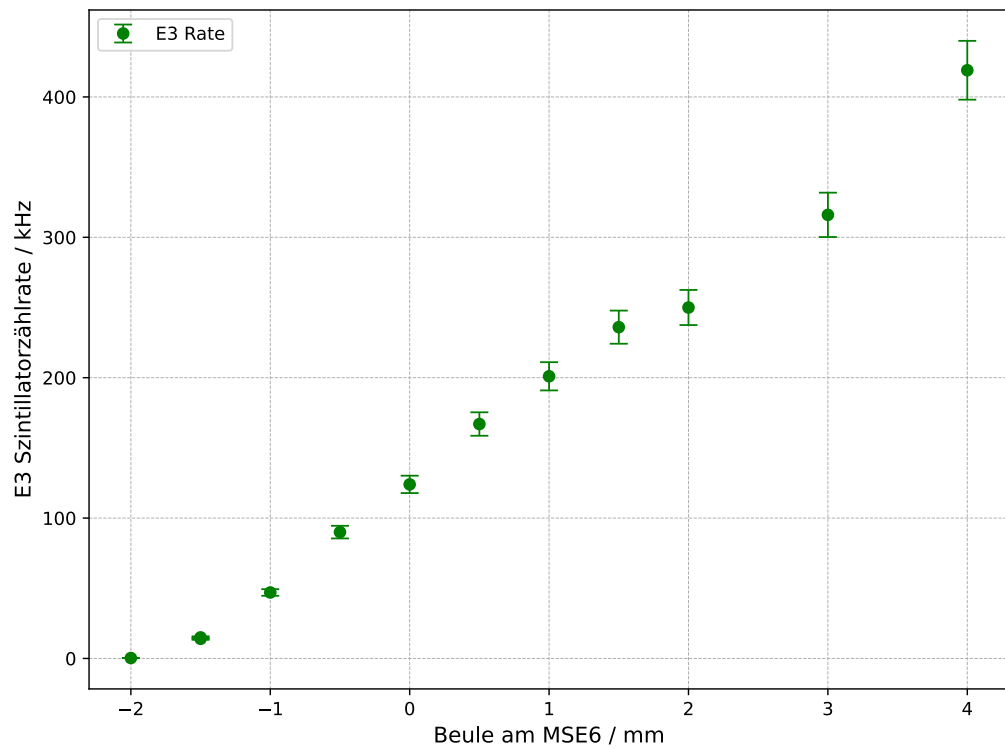


Abbildung 4.2: Einfluss von Beulen am MSE6 auf die maximale bei E3 gemessene Szintillatorzählrate.

Hier ist erneut ein annähernd linearer Verlauf zu erkennen. Das deckt sich mit vorherigen Abbildung 4.1, in der das Septum verstellt wurde anstelle einer Beule im Strahl. Die beiden Fälle sollten vom Verlauf her zumindest die selbe Abhängigkeit zeigen, da man in beiden Fällen analog den Abstand zwischen Strahl und Septumschneide verändert. Die beiden Abbildungen weisen ähnliche Abhängigkeiten auf.

5 Simultane Extraktion

Die Simultane Extraktion als Betriebsmodus zu untersuchen und als verwendbaren Betriebsmodus zu ermöglichen ist das Ziel dieser Arbeit. Dadurch wird es ermöglicht, Detektortests bei E3 gleichzeitig mit einem der Hauptexperimente bei E1/E2, beispielsweise Crystal Barrel (CB), durchzuführen. Dabei muss sichergestellt werden, dass das Hauptexperiment nicht signifikant von der zusätzlichen Extraktion gestört wird. Somit muss überprüft werden, ob sich die Strahlposition und -Winkel bei E1/E2 ändert, sich die Elektronenrate zu stark reduziert oder sonst irgendein Einfluss vom E3-Betrieb bei E1/E2 bemerkbar ist. Zunächst einmal musste jedoch überprüft werden, ob eine simultane Extraktion in der Realität so umsetzbar ist, wie es durch die Simulation suggeriert wird.

5.1 Erste simultane Extraktion

Für den ersten Versuch¹, simultan zu extrahieren, wurde ELSA auf normalen CB-Betrieb eingestellt². Zuvor wurde ein Szintillator in der E3 Strahlführung aufgebaut, der eine Rate anzeigt, sobald Elektronen auf ihn treffen. Das ist notwendig, da bei den geplanten Septumpositionen nur sehr kleine Raten an Elektronen erwartet werden und diese auf den Chromox-Schirmen nicht sichtbar wären. Anschließend wurde die Septumschneide vom MSE6, also des Vorseptums bei E3, Schritt für Schritt in den Strahlführungs-Kanal geschoben (vgl. 15:47 Uhr bis 15:58 Uhr in Abbildung 5.1). Nach Justage des SSH1³ ist zum Zeitpunkt 16:04 Uhr eine Rate von ca. 800 kHz erreicht worden. Die gemessene Rate liegt deutlich über der benötigten Rate und somit wurde die Septumschneide, unter Berücksichtigung der Positionsänderung am Szintillator, rausgefahren bis bei einer Septumposition von ca 13,5 mm die benötigte Rate von ca. 20 kHz erreicht wurde (vgl. 16:07 Uhr bis 16:29 Uhr in Abbildung 5.1). Hier wurden auch noch die Einflüsse weiterer Einstellungen an ELSA überprüft, was den Sprung der Rate um 16:15 Uhr verursachte. Anschließend wurde überprüft, ob die Änderung der Septumposition Einfluss auf die CB-Rate sowie auf Position und Winkel in horizontaler und vertikaler Ebene bei CB hatte. Hier sieht man auch, dass sich die Rate bei E3 sehr gut durch die Septumposition festlegen lässt.⁴ Dieser Zusammenhang wurde in der zweiten Strahlzeit für die Simultanen Extraktion genauer betrachtet. Auf die Darstellung der Fehler wurde in diesem Plot verzichtet, da es hier nur um die Beschreibung des Ablaufes der ersten Strahlzeit bei simultaner Extraktion geht.

¹Dieser fand am 07.11.2024 statt.

²Hier ist besonders, dass die CB-Taggingrate durch die LQs stabilisiert wird.

³Es gibt eine durch die Randfelder des Septum erzeugte horizontale Ablenkung der Extrahierten Teilchen.

⁴Der starke Einbruch der Raten um 16:37 Uhr ist auf einen Stahlverlust bei ELSA zurückzuführen und hat nichts mit der Position des Septum zu tun.

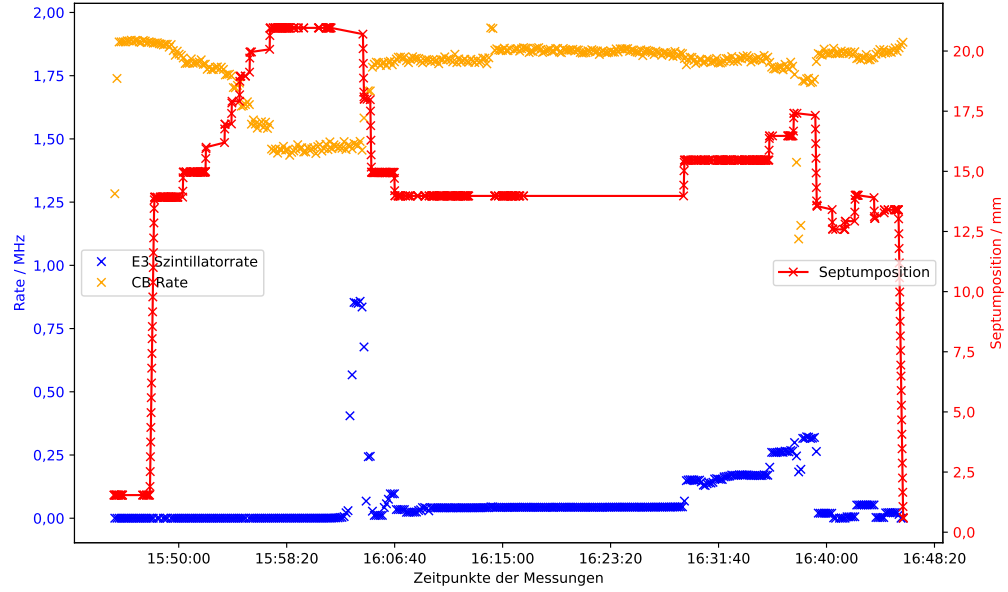


Abbildung 5.1: Gesamtverlauf der ersten simultanen Extraktion. Einfluss der Septumposition des MSE6 auf E3 und CB Rate.

5.1.1 Einfluss der E3 Septumposition auf CB Extraktionsrate

In einer zweiten Strahlzeit, die einen Monat nach der ersten stattfand, konnte die simultane Extraktion genauer untersucht werden. Es wurde gemessen, welchen Einfluss die Septumposition auf die Elektronenrate bei CB hat, während gleichzeitiger Extraktion nach E3. In Abbildung 5.2 ist zu sehen, dass die Septumpositionen im Bereich 9,5 mm bis 14,5 mm keinen Einfluss auf die CB-Taggingrate hat. Hier ist zu vermuten, dass eine Septumposition kleiner als 9,5 mm ebenfalls keinen Einfluss auf die CB-Rate hat. Natürlich wurde in der ersten Messung der simultanen Extraktion bereits festgestellt, dass diese Unabhängigkeit Grenzen hat. Je weiter die Septumschneide im Kanal der Strahlführung steht, desto größer ist der Einfluss auf die CB-Taggingrate (vgl. 5.1). Hier wurde der statistische Fehler als Messfehler für die CB-Taggingrate angenommen und wurde für jede einzelne Rate⁵ berechnet. Da die Rate R berechnet wird, indem die Anzahl N der Elektronen im CB-Tagger innerhalb eines Zyklus durch die Zykluszeit T_{zyklus} geteilt wird, gilt für die Rate R und den Fehler:

$$R = \frac{N}{T_{\text{zyklus}}}, \quad \Delta N = \sqrt{N} = \sqrt{R \cdot T_{\text{zyklus}}} \quad (5.1)$$

Dadurch berechnet sich der Fehler der Rate ΔR wie folgt:

$$\Delta R = \frac{dR}{dN} \cdot \Delta N = \frac{1}{T_{\text{zyklus}}} \cdot \sqrt{R \cdot T_{\text{zyklus}}} = \frac{\sqrt{R}}{\sqrt{T_{\text{zyklus}}}} \quad (5.2)$$

Für die Messungen lag die Zykluszeit bei $T_{\text{zyklus}} = 6,96$ s. Damit ergeben sich statistische Fehler in der Größenordnung 500 Hz, welche deutlich zu klein sind, um die Schwankungen im Plot zu erklären und auch nicht im Plot sichtbar sind. Welche weiteren von der Maschine abhängige Effekte hier eine Rolle spielen und diese Schwankungen verursachen wird an dieser Stelle nicht weiter vertieft.

⁵An dieser Stelle wird der Fehler nur für jede einzelne Rate bestimmt, da die Septumposition nur jeweils 15 s auf konstantem Wert bleibt und die Raten dadurch schwer einem Plato zuzuordnen sind.

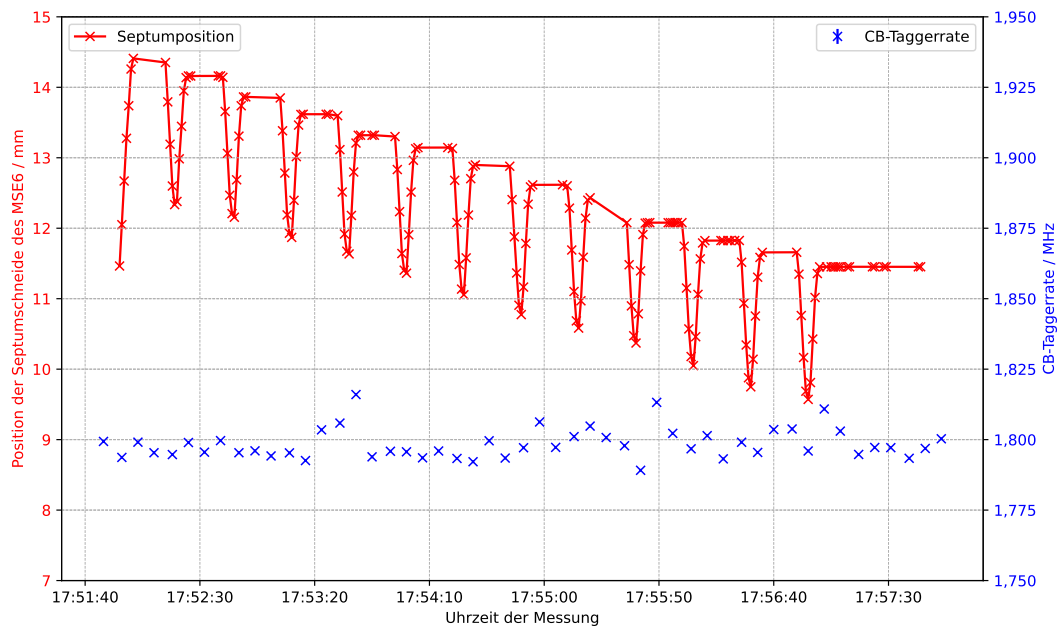


Abbildung 5.2: CB-Taggerate in Abhängigkeit der MSE6 Septumposition während simultaner Extraktion.

5.1.2 Einfluss der E3 Septumposition auf CB-Strahllage

Um die Stabilität der Extraktion zu gewährleisten, wird überprüft, welchen Einfluss die Änderung der Position der Septumschneide des MSE6 auf die Strahllage bei CB hat. Dieser sollte möglichst gering sein, um den Strahl bei CB nicht (zu stark) zu beeinflussen. Abbildung 5.3 zeigt den Einfluss der Position der Septumschneide am MSE6 auf die horizontale Strahlposition beim CB-Experiment. Die Strahlposition wird mithilfe eines Lagecavities bestimmt. Hier wurde die Standardabweichung als Fehler angenommen, da es keine Aufzeichnungen über den tatsächlichen Fehler existieren. Es wird deutlich, dass die Position auch ohne Verstellen der Septumschneide bereits recht stark schwankt. Jedoch appliziert CB eine Korrektur, die solche Schwankungen korrigiert [6]. Es kann nur ein leichter und daher gut kompensierbarer Einfluss der Septumposition des MSE6 auf die Position des Strahls bei CB festgestellt werden, wobei dieser auch andere Ursachen haben könnte.

Auch für den Winkel in horizontaler Ebene kann kein Einfluss festgestellt werden. Hier wurde eine andere und deutlich genauere Methode angewendet, die im nächsten Abschnitt erläutert wird.

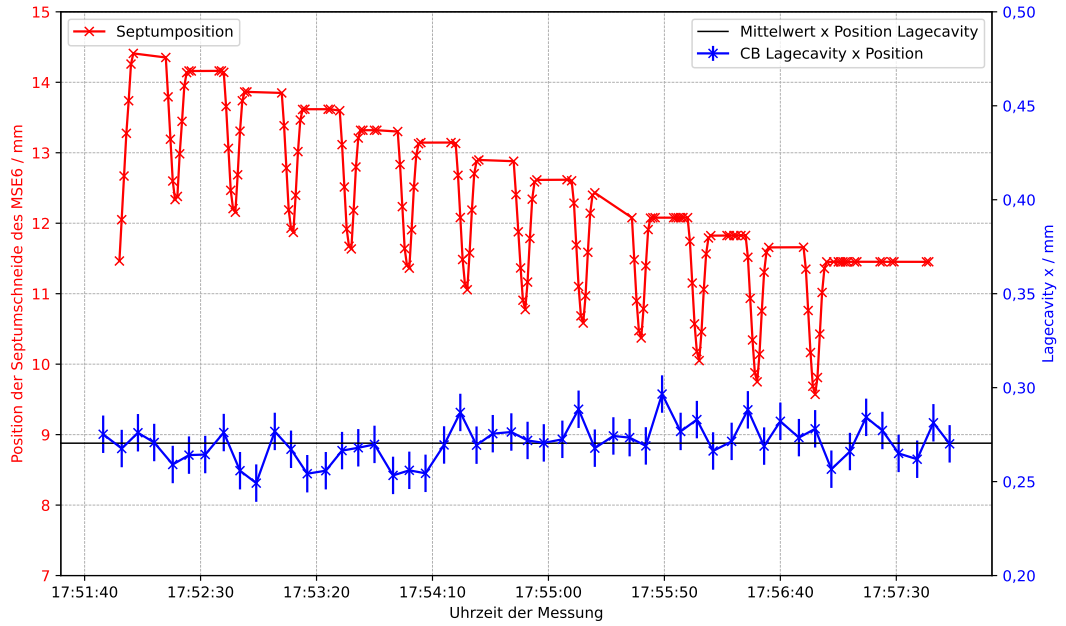


Abbildung 5.3: Horizontale Strahlposition bei CB in Abhängigkeit der MSE6 Septumposition während simultaner Extraktion.

5.1.3 Kohärente Kante

Um zu überprüfen, ob sich der Winkel des Elektronenstrahls bei CB nicht ändert, wenn man das Septum am MSE6 verstellt, wird die kohärente Kante analysiert. Diese ist Messgröße des Experiments, die eine sehr starke Winkelabhängigkeit aufweist und von der Energie des Teilchenstrahles und vom Winkel des Teilchenstrahls auf der Gitterebene eines in CB verwendeten Diamantkristalls abhängt. Die Kante reagiert sehr empfindlich auf eine Winkeländerung. So würde beispielsweise bei einer Elektronen-Energie von 1,4 GeV eine Änderung des Winkels von 0,3 mrad eine Änderung der Kante von ungefähr 100 MeV erzeugen [6]. Wenn man sich die kohärente Kante bei Änderung der Septumposition in Abbildung 5.4 anschaut, sieht man, dass hier keinerlei Änderung erzeugt wird, die größer als die Schwankungen sowie die Messfehler der Kante ist⁶. Die großen Fehler der kohärenten Kante zu Beginn und am Ende der Messzeit, sind auf das Ein- und Ausschalten der Messung zurückzuführen. Der leicht lineare Verlauf der Daten ab 17:55 Uhr ist wohl auch sonst in den Daten der kohärenten Kante sichtbar [6] und resultiert nicht aus der Verstellung der Septumschneide.

⁶Hier wurden die Fehler des Datensatzes verwendet, diese werden bei der Messung der kohärenten Kante direkt mit ausgegeben.

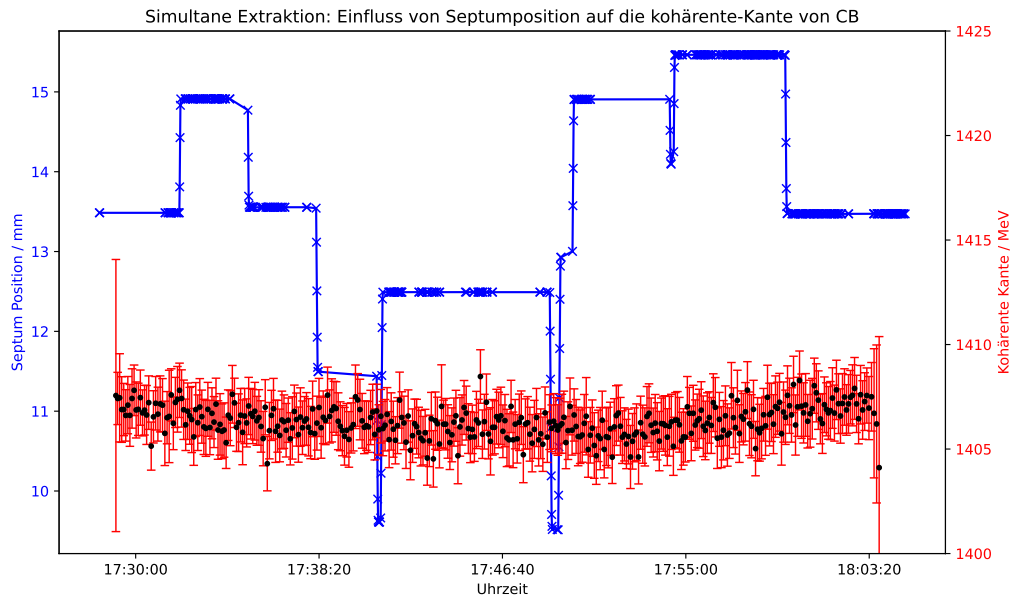


Abbildung 5.4: Einfluss einer Änderung der Position der Septumschneide des MSE6 auf die Position der kohärenten Kante.

5.1.4 Verwenden von Beulen zur simultanen Extraktion

Die Möglichkeit, die E3-Rate mit Hilfe von Beulen zu ändern, wurde bereits getestet und funktionierte ähnlich wie eine Änderung der Septumposition (vgl. Abbildung 4.2). Beim Beobachten der CB-Taggerate wurde jedoch bei den Beulen recht schnell deutlich, dass diese als alternative Möglichkeit der simultanen Extraktion nicht infrage kommen. In Abbildung 5.5 sieht man gut wie sich das Einstellen einer Beule am MSE6 auf die CB-Taggerate auswirkt. Hier wurde mit der selben Argumentation, die bereits für Abbildung 4.2 verwendet wurde (vgl. Kapitel 4.2), auf eine Darstellung der Fehler für die Beule verzichtet. An dieser Stelle wird auch der Fehler der Rate nicht dargestellt. Der statistische Fehler allein reicht nicht aus, um die starken Schwankungen zu erklären. Zudem wäre er aufgrund des großen Wertebereichs zu klein, um sichtbar zu sein. Es fällt außerdem auf, dass das Rauschen der Rate bei einigen Beulen stärker ausgeprägt ist als bei anderen (vgl. Abbildung 5.5). Das weist auf eine komplexe Fehlerursache hin, die hier nicht weiter untersucht wird. Aus diesen Gründen wird auf die Darstellung der Fehler verzichtet, da die Aussage der Abbildung auch ohne sie klar erkennbar ist. Man sieht, dass die Beule den Strahl auch am MSE22 beeinflusst und er dementsprechend nicht korrekt von den Korrektoren auf die ursprüngliche Bahn zurückgeführt wird. Somit wird die CB-Rate stark verändert, was für den simultanen Betrieb nicht passieren darf. Bei große Beulen wird sogar der geschlossene Orbit gestört und der Strahl wird messbar instabil.⁷

⁷Der starke Abfall der Rate um ca. 19:10 Uhr hatte nichts mit der eingestellten Beule zu tun, sondern war auf einen Ausfall bei ELSA zurückzuführen und kann deshalb hier ignoriert werden.

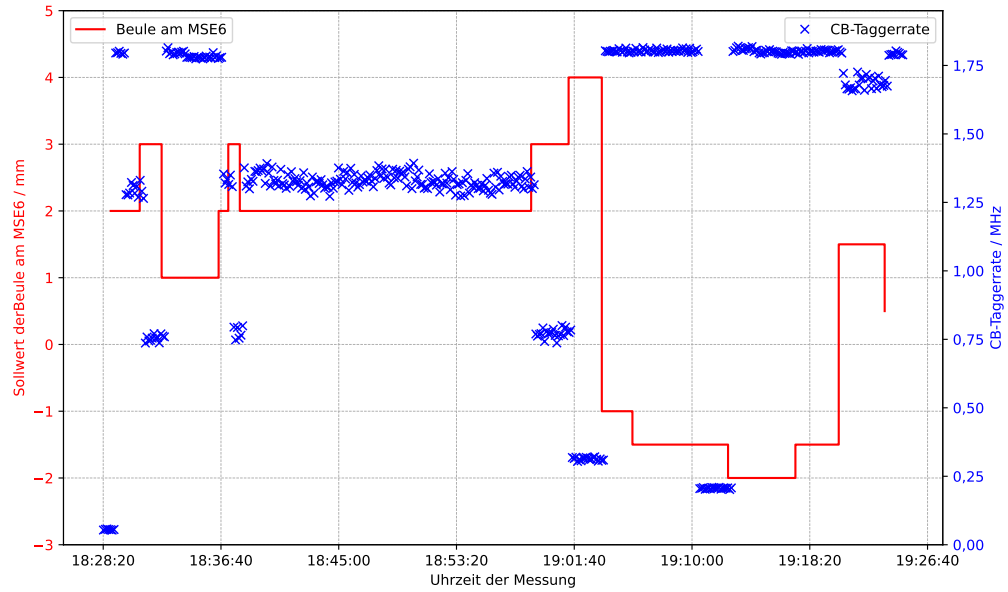


Abbildung 5.5: Einfluss von Beule am MSE6 auf die CB-Taggerate.

Auch der Einfluss der Trajektorienbeule auf die horizontale Strahlposition ist nicht optimal. In Abbildung 5.6 sieht man, dass die vom Lagecavity in der CB-Strahlführung gemessene horizontale Position bei Veränderungen der Beule am MSE6 deutlich variiert. Laut [6] darf die maximale Positionsänderung bei CB nur im Bereich von weniger Zehntel Millimeter liegen. Auch in diesem Plot ist der Ausfall bei ELSA um ca. 19:10 Uhr bemerkbar jedoch für diese Betrachtung irrelevant und kann ignoriert werden. In diesem Plot wurde, nach derselben Argumentation wie zuvor, auf die Darstellung der Fehler für die Position beim Lagecavity sowie der Beulengröße verzichtet.

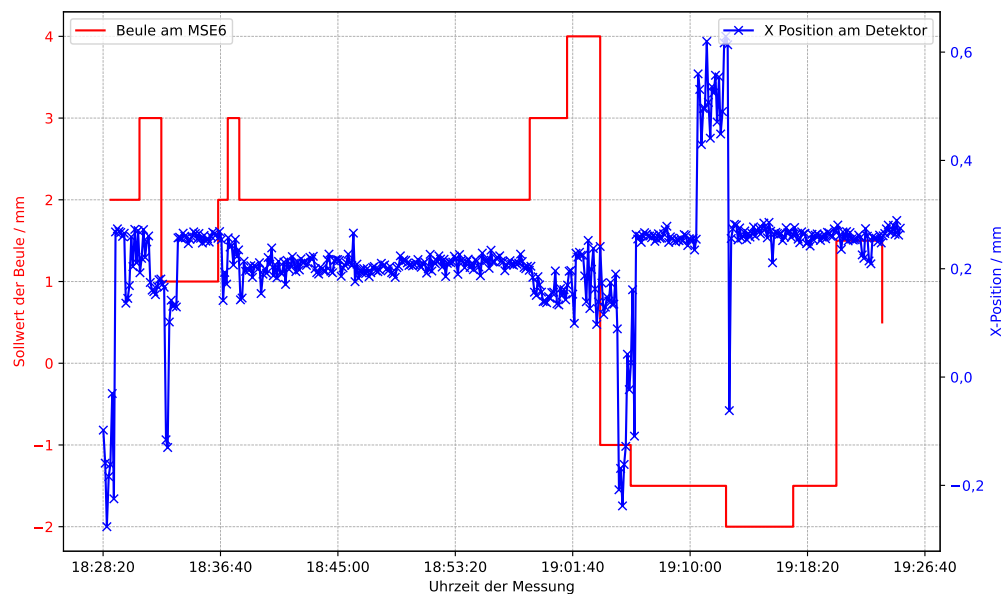


Abbildung 5.6: Einfluss einer Beule am MSE6 auf die Position des Strahls gemessen im Lagecavity bei CB.

5.1.5 Erkenntnisse aus den beiden Strahlzeiten mit simultaner Extraktion

In den Strahlzeiten konnte festgestellt werden, dass die Septumposition in einem Wertebereich von unter 14,5 mm keinen Einfluss auf die CB-Taggingrate hat. Auch die Strahlposition und die Winkel sind bei Änderungen der Septumposition innerhalb dieses Wertebereichs unverändert bzw. gering genug, um korrigiert werden zu können[6]. Es konnte auch festgestellt werden, dass eine Änderung der Beule nicht geeignet ist, um einen Teil des Strahls zu E3 zu extrahieren. Somit ist es möglich, die Septumposition (bis zu einer Grenze) während simultaner Extraktion zu ändern, ohne dass es einen beeinträchtigenden Einfluss auf den Strahl bei CB hat. Um sicherzustellen, dass sich die CB-Taggingrate während der Strahlzeit nicht mehr ändert, darf eine Änderung der Septumposition nur in dem zuvor untersuchten Wertebereich liegen⁸. Dieser lag während der Teststrahlzeiten unterhalb von 14,5 mm. Somit gewinnt man auch Einfluss auf die E3-Elektronenrate, die nach Abbildung 4.1 von sehr geringen Raten bis Größenordnung 100 kHz reguliert werden kann. Die mögliche Rate hängt von verschiedenen Einstellungen bei ELSA ab und kann je nach Strahlzeit variieren. Die Raten sollten jedoch in der selben Größenordnung liegen. Es sollte sich zur Sicherheit an der Septumposition orientiert werden. Mit geschlossenem Beamshutter in der E3-Strahlführung ist auch der Zugang zu den Detektoren während Strahlzeit möglich. Somit können die Detektortests auch während der Strahlzeit angepasst werden.

5.2 Strahlsteuerung in E3 Strahlführung

Bei der simultanen Extraktion arbeitet man in der E3-Strahlführung mit sehr geringen Teilchenraten im Bereich von 0 kHz bis 100 kHz. Bei solch kleinen Raten ist der Strahl auf den Strahlschirmen der E3-Strahlführung nicht sichtbar, da die Elektronen zu wenig Lichtintensität auf ihnen erzeugen. Das bedeutet, dass die klassischen Methoden der Strahlpositionsbestimmung mittels Digitalkamera nicht möglich sind. Deshalb muss man schon vorher wissen, wie der Strahl in die Strahlführung kommt und wie die drei Strahlschieber, die in der E3 Strahlführung verbaut, sind geschaltet werden müssen, um den Strahl so zu bewegen, dass er an der gewünschten Position am Target ankommt. Die Strahlschieber sind Dipolmagnete, die den Strahl in der Strahlführung ablenken bzw. korrigieren können, falls er nicht an gewünschter Position liegt.

5.2.1 Responsematrix

Um die Position auch im Niedrig-Raten-Modus anpassen zu können, verwendet man eine bei hohen Raten aufgenommene Responsematrix. Diese Responsematrix R enthält die relative Positionsänderung Δx_i sowie die relative Winkeländerung $\Delta x'_i$ am Targetschirm (Schirm 5) in Abhängigkeit von der Kickstärke des i 'ten Strahlschiebers (horizontal)

$$R = \begin{pmatrix} \Delta x_1 & \Delta x_2 & \Delta x_3 \\ \Delta x'_1 & \Delta x'_2 & \Delta x'_3 \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

Wenn man jetzt die Kickstärke k_i der drei Strahlschieber ($i = 1, 2, 3$) hat, lässt sich x und x' auf Schirm 5 berechnen durch:

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta x_1 & \Delta x_2 & \Delta x_3 \\ \Delta x'_1 & \Delta x'_2 & \Delta x'_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

Nach Invertierung der Responsematrix, könnte man die Formel so umstellen, dass man sie die Kickstärken für eine gewünschte Position und Winkel auf Schirm 5 berechnet:

$$\begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta x_1 & \Delta x_2 & \Delta x_3 \\ \Delta x'_1 & \Delta x'_2 & \Delta x'_3 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

⁸Dieser kann je nach Strahlzeit stark variieren und ist von vielen Einstellungen abhängig.

Diese Umrechnung liefert einem die Kickstärken, die man auf die alten Kickstärken addieren muss, um die gewünschte Position/Winkel zu erhalten. Somit ist es auch im Niedrig-Raten-Modus möglich (mit bekannter Responsematrix) die Position des Strahls nach Wunsch einzustellen. Die Invertierung einer 3×2 Matrix ist mathematisch nur numerisch möglich, da es keine quadratische Matrix ist. Stattdessen greift man auf eine Pseudoinverse Matrix zurück, die durch Singulärwertzerlegung (SVD) berechnet werden kann. Dazu wird R in einzelne Teilmatrizen zerlegt:

$$R = U \Sigma V^*, \quad (5.6)$$

Diese Teilmatrizen können dann invertiert und anschließend wieder zur Pseudo-Inversen R^{-1} zusammengesetzt werden:

$$R^{-1} = V \Sigma^{-1} U^*. \quad (5.7)$$

5.2.2 Testen einer Responsematrix mit elegant

Die Simulation funktioniert wie folgt: Zunächst muss die Responsematrix erstellt werden. Dazu wird entweder ein Teilchenpaket oder ein einzelnes Teilchen in der E3 Strahlführung simuliert. Anschließend werden die Strahlschieber jeweils variiert und die mittlere Position/Winkel der Teilchen am Targetschirm gegen die Kick-Stärke aufgetragen. Dann wird eine Geraden-Anpassung⁹ durchgeführt und die jeweiligen Steigungen richtig angeordnet in die Matrix geschrieben. Diese wird anschließend mit der SVD-Methode invertiert. Daraufhin wird die Matrix mit den Kickstärken für die Wunschposition mit abgezogenem Offset berechnet und auch direkt für die einzelnen Strahlschieber in der Lattice-Datei eingesetzt. Der Offset ist hierbei Position/Winkel auf Schirm 5 bei ausgeschalteten Strahlschiebern und wird durch die Anfangsbedingungen bedingt. Anschließend wird nochmal überprüft, ob die gewünschte Position auch wirklich getroffen wurde. Dieses Konzept hat in der Simulation sehr zuverlässig und präzise funktioniert. Die bestimmte Responsematrix¹⁰ lautet:

$$\begin{pmatrix} 22,021\,23 \text{ m rad}^{-1} & 12,090\,28 \text{ m rad}^{-1} & 4,071\,23 \text{ m rad}^{-1} \\ 2,7529 & 1,786\,33 & 1,124\,52 \end{pmatrix} \quad (5.8)$$

Die invertierte Responsematrix ergibt sich zu:

$$\begin{pmatrix} 0,100\,07 \text{ rad m}^{-1} & -0,493\,04 \\ -0,0367 \text{ rad m}^{-1} & 0,413\,12 \\ -0,186\,69 \text{ rad m}^{-1} & 1,440\,00 \end{pmatrix} \quad (5.9)$$

Damit lassen sich beispielsweise die Positionen $\begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,009\,34 \text{ m} \\ 0,000\,92 \text{ rad} \end{pmatrix}$ mit der Kickmatrix:

$$\begin{pmatrix} -0,000\,48 \text{ rad} \\ -0,000\,04 \text{ rad} \\ 0,000\,42 \text{ rad} \end{pmatrix} \quad (5.10)$$

auf $\begin{pmatrix} 0,000\,00 \text{ m} \\ 0,000\,00 \text{ rad} \end{pmatrix}$ korrigieren.¹¹

⁹Das wäre prinzipiell nicht notwendig gewesen, da es ein absolut linearer Zusammenhang ist.

¹⁰Die zweite Zeile enthält die Winkeländerung am Target in Abhängigkeit vom Kickwinkel des Strahlschiebers. Die Einheit ist also rad rad^{-1} und kürzt sich gegenseitig weg.

¹¹Da dies eine Simulation ist und sich auf die Angabe von 5 Nachkommastellen beschränkt wurde, werden keine Fehler angegeben, da die Maschinenfehler deutlich kleinere Größenordnungen haben.

5.2.3 Messmethodik

Wenn man eine Responsematrix in der E3-Strahlführung wirklich implementieren möchte, muss man einige Änderungen zur Simulation vornehmen. Zum einen ist der SSH1, der erste Strahlschieber in horizontaler Richtung, nicht umpolbar. Dadurch kann er keine negativen Strahlverschiebungen verursachen. Das wäre grundsätzlich kein Problem, allerdings hat man mathematisch bei Invertierung keinen Einfluss auf die Vorzeichen innerhalb der invertierten Matrix und dadurch war es nicht möglich nur positive Werte für den Strahlschieber zu erhalten wenn man die inverse Responsematrix für alle drei Strahlschieber berechnet. Das lässt sich lösen, indem man die Responsematrix nur für die letzten beiden Strahlschieber verwendet und mit dem ersten Strahlschieber die Tendenz vorgibt.

Ein weiterer Unterschied ist die Messung der Position und der Winkel. Hierzu muss der Strahl von einer CCD Kamera auf einem Schirm betrachtet werden. Anschließend wird ein zweidimensionaler Gauß an die Daten angepasst, um den Mittelpunkt des Strahls zu bestimmen. Für den Winkel wird zusätzlich zum Targetschirm noch der Schirm 4 verwendet. Dieser steht ca 1,89 m vor dem Target in der Strahlführung. Das funktioniert, da sich zwischen Schirm 4 und 5 keine winkeländernde Elemente wie Dipole oder Quadrupole befinden. Über den Zusammenhang:

$$x' = \arctan\left(\frac{x_5 - x_4}{1,89m}\right) \approx \frac{x_5 - x_4}{1,89m} \quad (5.11)$$

wobei x_4 bzw. x_5 der Strahl-Mittelpunkt auf Schirm 4 bzw. 5 ist, kann der Winkel bei auf Schirm 5 berechnet werden. Da es sich nur um kleine Winkel handelt und die Kleinwinkelnäherung kann hier verwendet werden. Der Strahl wandert während der Extraktionsphase, deshalb muss man bei der Messung der relativen Positions- und Winkeländerungen immer zum gleichen Zeitpunkt der Extraktion messen. Außerdem muss für die Winkelmessung immer der 4. Schirm eingefahren und anschließend wieder zurückgefahren werden. Das zusammengekommen macht den Messprozess relativ lang, weshalb man anstelle eines Geraden-Fit nur eine relative Änderung der Strahllage misst. Da man um 1 mrad kickt, ist der gemessene Wert direkt die Steigung, die man sonst aus dem Geraden-Fit erhalten würde. Leider hat der dafür geschriebene Python-Code aus noch unbekannten Gründen nicht funktioniert und konnte im Rahmen der Arbeit nicht mehr funktional eingesetzt werden. Die Vermutung ist, dass der Python-Code aufgrund der Schwankungen des Strahls die Änderung der Position auf Schirm 5 in Abhängigkeit von den Ablenkungswinkeln der Strahlschieber nicht genau genug messen kann. Dadurch ist der Strahl nur sehr unpräzise zu positionieren, da der Fehler hier durch Multiplikation mit dem Korrekturfaktor große Fehler im Bereich von mehreren Millimetern bzw. Milliradian erzeugt.

6 Ergebnisse und Ausblick

In dieser Arbeit wurde das auf der Resonanzextraktion basierende Konzept der simultanen Extraktion untersucht und getestet. Dazu wurden vorbereitende Simulationen unter Verwendung der Simulationssoftware *elegant*[2] durchgeführt, um den Umgang mit der Strahlführung zu erproben und Erkenntnisse über das Verhalten der Elektronen während der simultanen Extraktion zu sammeln. Durch Messungen an ELSA, während der Extraktion nach E3, konnten Daten und Erfahrungen gesammelt werden, mit denen in der ersten geplanten Strahlzeit für simultane Extraktion diese bereits erfolgreich durchgeführt werden konnte. Hier wurde es geschafft gleichzeitig am Crystal Barrel Experiment bei E1/2 sowie an den im E3 für Messungen aufgebauten Szintillator extrahierte Elektronen zu messen. Durch ein Verstellen der Septumschneide konnten die Raten an beiden Experimentierplätzen verändert werden. Es wurden viele Daten und Erfahrungen gesammelt, mit denen man in einer zweiten Strahlzeit für simultane Extraktion gezielte Messungen durchführen konnte. Es wurde ein Bereich definiert, in dem eine Änderung der Position der Septumschneide des MSE6 bei E3 keinen Einfluss auf den zu den Hauptexperimenten extrahierten Strahl hat. Dieser Bereich verlief in den Strahlzeiten von 0 mm bis 14,5 mm und hat es einem erlaubt die Elektronen-Rate bei E3 im Bereich von 0 Hz bis Größenordnung 100 kHz zu variieren. Es wurde auch die Verwendung von Beulen im Orbit des Elektronenstrahls getestet, um diesen näher an das Septum zu schieben. Diese Idee konnte jedoch aufgrund von Messungen verworfen werden, die zeigen, dass die Beulen einen unakzeptablen Einfluss auf die Elektronenrate und die Strahlposition bei den Hauptexperimenten haben. Derzeit gibt es noch einige Phänomene, unter anderem die Unterstruktur der Teilchenrate während Extraktion, die noch weiter untersucht und verstanden werden müssen. Durch diese Erkenntnisse und Errungenschaften ist es möglich, den Betriebsmodus „Simultane Extraktion“ bei ELSA zu implementieren. Somit können, während der Strahlzeit für eines der Hauptexperimente (BGOOD oder Crystal Barrel), zeitgleich auch Detektortests bei E3 uneingeschränkt durchgeführt werden. Das führt dazu, dass man insgesamt die Strahlzeit und dadurch auch die damit verbundenen Kosten reduzieren kann. Gleichzeitig ist man aber auch in der Lage, durch mehr Flexibilität bei den Detektortests, auch die Forschung und Entwicklung zu begünstigen. Zum Zeitpunkt der Abgabe dieser Arbeit läuft bereits die erste geplante Strahlzeit mit simultaner Extraktion nach BGOOD und zu ALICE nach E3.

Literaturverzeichnis

- [1] K.-T. Brinkmann B. Krusche. Crystal barrel. Besucht am 02. Februar 2025.
- [2] M Borland. Elegant: A flexible sdds-compliant code for accelerator simulation. Technical report, Argonne National Lab., IL (US), 08 2000.
- [3] Dennis Proft. *Optimierung des Beschleunigerbetriebs für Experimente zur Hadronen- und Detektorphysik an der Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA*. PhD thesis, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, July 2019.
- [4] L. Badano et al. Synchrotrons for hardrone therapy.
- [5] Michael Gentner. Preparation of particle beams for experiments in hadron physics: Slow extraction at ELFE at DESY and ELSA, and beam cooling at HERA. Masterarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, February 1999.
- [6] Jan Hartmann. Persönliche Mitteilung. Januar 2025.
- [7] Samuel Kroneberg. Entwicklung einer Softwarebibliothek zur automatisierten Analyse von Strahlabbildern an ELSA. Bachelorarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, September 2020.
- [8] Markus Hoffmann. *Beschleunigung polarisierter Elektronen in der Bonner Elektronen-Beschleunigeranlage ELSA*. PhD thesis, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2002.
- [9] Michael T. Switka. *Photon Based Electron Beam Analysis at ELSA Utilizing Synchrotron Radiation and Compton Scattering*. PhD thesis, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, November 2020.
- [10] Nikolas Heurich. *Die externe Strahlführung für Detektortests X3ED an der Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA*. PhD thesis, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 12 2017.
- [11] Sven Zander. *Optische Strahldiagnose an der Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA*. PhD thesis, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, October 2013.
- [12] Jens-Peter Thiry. *Weiterentwicklung und Optimierung der Kontrolle der geschlossenen Gleichgewichtsbahn und des Modells der Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA*. PhD thesis, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, April 2023.
- [13] Leonardo Thome. Messmethoden zur Bestimmung der applizierten Dosis in biologischen Proben für FLASH an ELSA. Bachelorarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, March 2023.
- [14] Klaus Wille. *The physics of particle accelerators: an introduction*. Clarendon Press, 2000.

7 Anhang

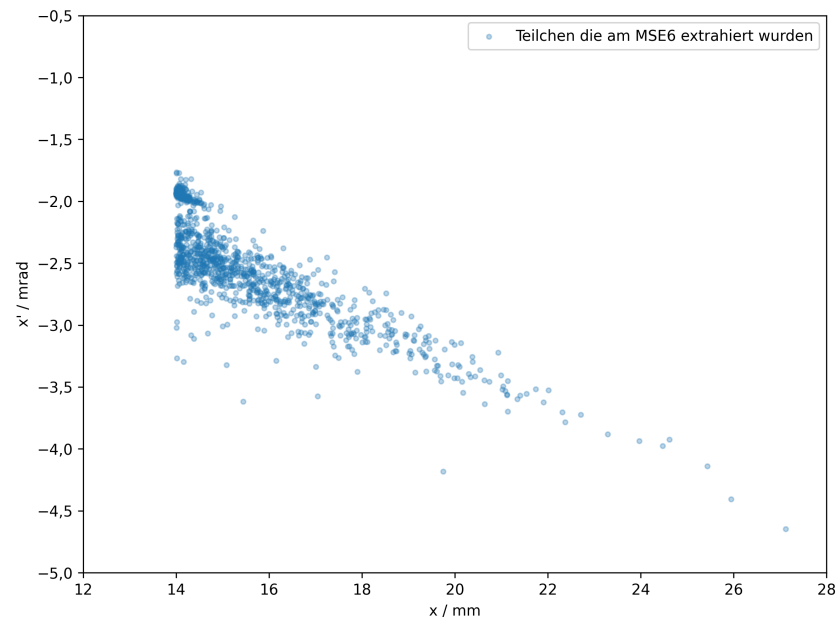


Abbildung 7.1: Phasenraum der am MSE6 extrahierten Teilchen ohne Synchrotronstrahlung und ungefiltert.

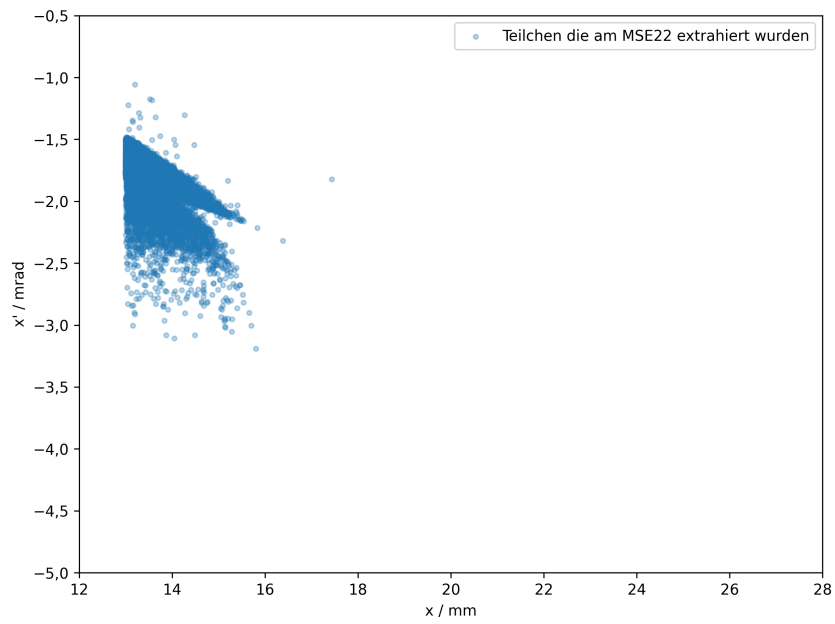


Abbildung 7.2: Phasenraum der am MSE22 extrahierten Teilchen ohne Synchrotronstrahlung und ungefiltert.

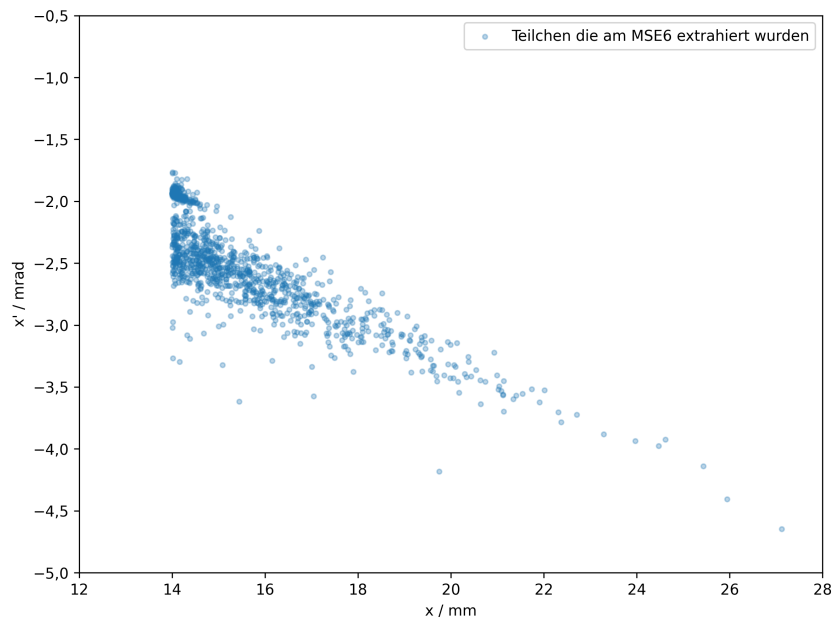


Abbildung 7.3: Phasenraum der am MSE6 extrahierten Teilchen mit Synchrotronstrahlung und ungefiltert.

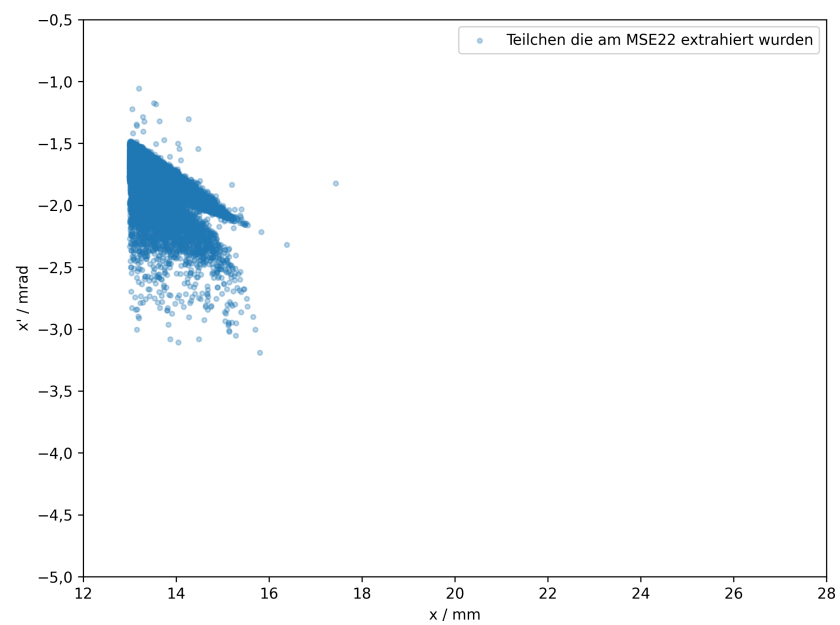


Abbildung 7.4: Phasenraum der am MSE22 extrahierten Teilchen mit Synchrotronstrahlung und ungefiltert.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Elektronen Strecher-Anlage-ELSA	5
2.2	Externe Strahlführung zu E3 bei ELSA	6
2.3	Separatrix bei drittelzahliger Resonanz	7
3.1	Phasenraumellipsen für Teilchen mit verschiedenen Horizontalen Offsets	9
3.2	Separatrix	10
3.3	Phasenraum der extrahierten Teilchen am MSE6	12
3.4	Phasenraum der extrahierten Teilchen am MSE22	12
3.5	Histogramm Anzahl an extrahierten Teilchen pro Umlauf	13
3.6	Separatrix bei Änderung des Arbeitspunktes	14
3.7	Phasenraum der extrahierten Teilchen am MSE6	15
3.8	Phasenraum der extrahierten Teilchen am MSE22	15
3.9	Histogramm Anzahl an extrahierten Teilchen pro Umlauf	16
4.1	Einfluss Septum auf E3-Rate	18
4.2	Einfluss Beule auf E3-Rate	19
5.1	Erste simultane Extraktion	21
5.2	Taggingrate in Abhängigkeit von Septumposition	22
5.3	Horizontale CB Strahlposition in Abhängigkeit von Septum	23
5.4	Kohärente Kante bei Änderung der Septumposition	24
5.5	Einfluss von Beule auf CB-Rate	25
5.6	Einfluss Beule auf CB Lagecavity X Position	25
7.1	Phasenraum der extrahierten Teilchen am MSE6	31
7.2	Phasenraum der extrahierten Teilchen am MSE22	32
7.3	Phasenraum der extrahierten Teilchen am MSE6	32
7.4	Phasenraum der extrahierten Teilchen am MSE22	33